



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

THE FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH POLÍ NA ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

MAGNETIC FIELD MEASUREMENT ON ELECTRICAL
MACHINES

BAKALÁRSKA PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

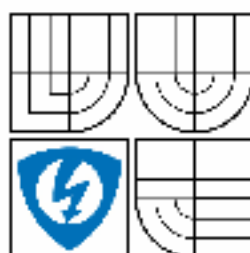
VILIAM MANDUCH

VEDÚCI PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ALEŠ MIKULČÍK

Brno, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Viliam Manduch

ID: 98380

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Měření magnetických polí na elektrických strojích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte princip řešení pro měření magnetického pole na daném elektrickém stroji.
2. Proměřte pomocí zvolené metody magnetické pole v okolí zvoleného elektrického stroje.
3. Vytvořte 3D graf magnetického pole v okolí elektrického stroje.
4. Zhodnoťte výsledky měření a použitou metodu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 29.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Aleš Mikulčík

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Anotácia:

Táto bakalárka práca sa zaoberá magnetickým poľom a princípmi, na ktorých sú založené senzory na jeho meranie. Ďalšia časť práce skúma rozloženie magnetického poľa v okolí asynchrónneho motora.

Analýza je vyhodnocovaná pomocou grafického spracovania nameraných hodnôt a jej súčasťou je tiež aj porovnanie týchto hodnôt s vypočítanými hodnotami pomocou metódy konečných prvkov v programe FEMM.

Kľúčové slová:

Asynchrónny motor; FEMM; Magnetické pole; Senzor

Abstract:

This bachelor thesis deals with magnetic field and the principles on which sensors for it's measuring are based on. The following part of the bachelor work investigates the distribution of magnetic field in the environs of asynchronous engine.

Analysis is evaluated with the assistance of graphical processing of measured values and a part of the analysis is also the comparison of this values with the values calculated with assistance of the method of final compoments in program FEMM.

Keywords:

Asynchronous engine; FEMM; Magnetic field; Sensor

Bibliografická citácia:

MANDUCH, V. *Měření magnetických polí na elektrických strojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Mikulčík.

Prehlásenie:

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Meranie magnetických polí na elektrických strojoch som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

PodĎakovanie

Touto cestou by som rád poďakoval vedúcemu tejto bakalárskej práce, ktorým je

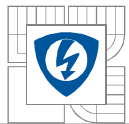
Ing. Aleš Mikulčík a taktiež konzultantovi Ing. Marcelovi Jandovi, za ich ochotu a odbornú pomoc.

V Brně dne

Podpis autora

Obsah:

1 ÚVOD	8
2 MAGNETICKÉ POLE	9
2.1 ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE VELIČINY POPISUJÚCE MAGNETICKÉ POLE	9
2.2 STACIONÁRNE MAGNETICKÉ POLE	11
2.2.1 MAGNETICKÉ INDUKČNÉ ČIARY	11
2.2.2 MAGNETICKÉ POLE TYČOVÉHO MAGNETU	11
2.2.3 MAGNETICKÉ POLE PRIAMEHO VODIČA, KTORÝM PRETEKÁ PRÚD	12
2.2.4 MAGNETICKÉ POLE DVOCH ROVNOBEŽNÝCH VODIČOV S PRÚDOM	13
2.2.5 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI LÁTKY	14
2.3 NESTACIONÁRNE MAGNETICKÉ POLE	14
2.3.1 ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCIA	14
2.3.2 VLASTNÁ INDUKCIA	15
3 MAGNETICKÉ SENZORY	16
3.1 SPÔSOBY MERANIA MAGNETICKÉHO POJA VO VZDUCHU	16
3.1.1 HALLOVE SENZORY	16
3.1.2 FLUXGATE SENZORY	18
3.1.3 FEROMAGNETICKÉ MAGNETOREZISTÍVNE ČIDLÁ (AMR)	20
4 ASYNCHRÓNNY MOTOR	23
5 FEMM (FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS)	26
6 MERANIE MAGNETICKÉHO POJA NA ASYNCHRÓNOM MOTORE	28
7 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POJA ASYNCHRÓNNEHO MOTORA POMOCOU PROGRAMU FEMM	37
8 ZÁVER	41
ZOZNAM LITERATÚRY	43
ZOZNAM OBRÁZKOV, GRAFOV	44
PRÍLOHA A – TABUĽKY NAMERANÝCH A VYPOČÍTANÝCH HODNÔT	46



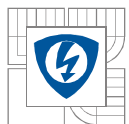
1 ÚVOD

Vzhľadom k tomu, že okolo nás je všade prítomné magnetické pole, je prospešné sa ním zaoberať a skúmať ho. Počiatočné zistenia magnetických vlastností a ich následné skúmania siahajú do dávnej doby ešte pred náš letopočet. Dnes sa v moderných technológiách stretneme s využívaním magnetizmu pomaly na každom kroku. Tento fyzikálny jav našiel uplatnenie takmer v každej priemyselnej oblasti a jeho použitie má v živote človeka obrovský význam. Vynašli sa rôzne princípy, čo magnetické pole využívajú alebo priamo snímajú, prostredníctvom ktorých je možné v súvisiacich závislostiach merať potrebné veličiny. Na týchto princípoch sú založené rôzne meracie a vyhodnocovacie prístroje. Snímaním magnetického poľa sme schopní ho definovať, tzn. určiť jeho priebeh, veľkosť a tvar, čím získame o ňom dôležité údaje. Pri konštrukciách elektrických zariadení zohrávajú práve tieto poznatky veľkú rolu.

Charakter a veľkosť magnetického poľa vznikajúceho v okolí elektrických strojov je závislý na ich konštrukčnom prevedení. Záleží na vlastnostiach použitých materiálov a vyhotovenia plášťa, statorovej a rotorovej časti stroja. Plášte strojov majú na výslednú veľkosť a charakter magnetického poľa v jeho okolí najvýraznejší vplyv. Plášte sa vyrábajú zväčša z materiálov, ktoré zabezpečujú vysoké tienenie magnetického poľa.

Práca sa zaoberá magnetickým poľom a princípmi, na ktorých sú založené senzory na jeho meranie a analýzou magnetického poľa v okolí asynchrónneho motora.

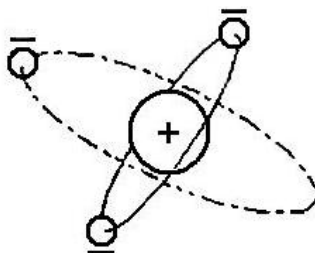
Cieľom analýzy je zmapovať rozloženie magnetického poľa v okolí asynchrónneho motora. Tá je doplnená o vypočítané hodnoty použitím metódy konečných prvkov v programe FEMM.



2 MAGNETICKÉ POLE

Magnetické pole ako každé pole sa prejavuje silovými účinkami. To znamená, že je vektor a v každom bode priestoru má veľkosť a smer. Silové účinky sú najviac badateľné v oblasti magnetických pólov. Každý magnet má dva magnetické póly na protiľahlých stranách, ktoré sú opačne orientované. Dohodou bolo stanovené označenie týchto pólov ako severný " N " (North) a južný " S " (South). Magnet je dipólom (má neoddeliteľné póly). Pri rozrezaní magnetu vznikne dvojica opačných pólov. Magnetické pole znázorňujú indukčné čiary. Konvenciou sa dohodol ich smer, vychádzajú zo severného zdroja magnetického poľa a vstupujú do zdroja južného.

Teória objasňujúca podstatu magnetického poľa je založená na poznatkoch javov súvisiacich pri prechode elektrického prúdu vodičom a teórii o štruktúre hmoty. Magnetické pole má svoj pôvod v medziatomárnych a medzimolekulárnych prstencových prúdoch. Elektróny, ktoré sú nosičom elektrického náboja, pri svojom pohybe vo vnútri atómu (spinová rotácia a obiehanie okolo jadra atómu) vytvárajú elementárne magnetické momenty. Ak sú elementárne magnetické momenty jednotlivých elektrónov v atónoch orientované úplne neusporiadane (náhodne), vzájomne sa vykompenzujú a daná látka nie je zdrojom magnetického poľa. Teda čím viac elementárnych magnetických momentov elektrónov je v látke súhlasne orientovaných, tým viac sa stáva magnetickou. Na základe tohto javu pôsobením vonkajšieho magnetického poľa sa isté materiály dajú magnetizovať, a to dočasne, alebo špeciálnymi procesmi trvalo. [1] [2]



Obrázok 1. Znázornenie spinovej rotácie a obiehanie okolo jadra atómu [1]

2.1 Základné fyzikálne veličiny popisujúce magnetické pole

Magnetická indukcia (B)

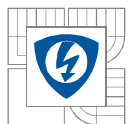
Magnetická indukcia je vektorová fyzikálna veličina, ktorá charakterizuje magnetické pole a je závislá len na jeho veľkosti. Indukcia je silové pôsobenie magnetického poľa. Vyjadruje hustotu, t.j. počet indukčných čiar, ktoré v magnetickom poli prechádzajú jednotkovou plochou 1m^2 kolmou na smer siločiar. Ak je plocha kolmá na indukčné čiary, indukcia nezávisí od prostredia (permeability μ). Smer indukcie je vždy dotyčnica k indukčným čiarom a je aj rovnako orientovaná od N do S pólu magnetu. Fyzikálna jednotka magnetickej indukcie je 1T (tesla). Pre veľkosť magnetickej indukcie priameho vodiča platí:

$$B = \mu \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad [\text{T}] \quad (2.1)$$

kde: I – veľkosť prúdu prechádzajúceho vodičom [A]

d – vzdialenosť od vodiča [m]

μ – permeabilita prostredia (popísaná nižšie) [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$]



Magnetický tok (Φ)

Magnetický tok je to vektorová fyzikálna veličina, ktorá vyjadruje počet indukčných čiar magnetického poľa prechádzajúcich danou plochou (súhrnný tok magnetickej indukcie danou plochou). Magnetický tok závisí od vzájomnej polohy prechádzajúcich indukčných čiar a plochy, ktorou prechádzajú. Fyzikálnou jednotkou magnetického toku je 1 Wb (weber).

Veľkosť magnetického toku, ak indukčné čiary homogénneho magnetického poľa o indukcií B sú kolmé na danú plochu S zistíme podľa vzťahu:

$$\Phi = B \cdot S \quad [\text{Wb}] \quad (2.2)$$

Veľkosť magnetického toku, ak indukčné čiary homogénneho magnetického poľa o indukcií B zvierajú s danou plochou S uhol α zistíme podľa vzťahu:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha \quad [\text{Wb}] \quad (2.3)$$

Intenzita magnetického poľa (H)

Intenzita magnetického poľa je vektorová fyzikálna veličina, ktorej smer je vyjadrený smerom indukčných čiar. Vyjadruje mieru sily pôsobiacej v určitom mieste poľa na zanedbateľne veľký objem feromagnetikkej látky alebo na myslený magnetický náboj v závislosti na faktoroch, ktoré pole vytvárajú (napr. veľkosť elektrického prúdu tečúceho vodičom) a nezávisle na parametroch vytvoreného magnetického poľa. Intenzita je najsilnejšia v blízkosti povrchu vodiča a úmerne klesá s narastajúcou vzdialenosťou od neho. Vo veľkej vzdialenosti je intenzita zanedbateľná. Fyzikálnou jednotkou intenzity magnetického poľa je $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

Intenzita magnetického poľa je definovaná ako podiel magnetického napätia medzi dvomi bodmi a dĺžkou tohto úseku:

$$H = \frac{U_{m12}}{l_{12}} \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2.4)$$

kde: U_{m12} – magnetické napätie medzi dvomi bodmi indukčnej čiary [A]

l_{12} – dĺžka medzi dvoma bodmi indukčnej čiary [m]

Vzťah medzi intenzitou a indukciou magnetického poľa je definovaný ako:

$$H = \frac{B}{\mu} \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2.5)$$

Permeabilita alebo priepustnosť prostredia (μ)

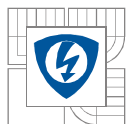
Permeabilita je skalárna fyzikálna veličina, ktorá vyjadruje magnetickú polarizovateľnosť (priepustnosť magnetického poľa) prostredia, v ktorom je magnetické pole vytvárané. Je tvorená relatívnou permeabilitou prostredia μ_r a permeabilitou vákua μ_0 . Fyzikálnou jednotkou permeability prostredia je $1 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

Veľkosť permeability vyjadríme už z vyššie spomínaného vzťahu ako:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2.6)$$

Pre permeabilitu prostredia taktiež platí vzťah:

$$\mu = \mu_0 + \mu_r \quad [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2.7)$$



Permeabilita alebo priepustnosť vákua (μ_0)

Permeabilita vákua je magnetická indukčná konštanta. Je skalárnou fyzikálnou veličinou, vyjadrujúcou magnetickú polarizovateľnosť (priepustnosť magnetického poľa) vákua. Fyzikálnou jednotkou permeability vákua je $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$.

Jej hodnota je:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256637 \cdot 10^{-6} \quad [\text{H}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (2.8)$$

Relatívna pomerná permeabilita alebo priepustnosť prostredia (μ_r)

Relatívnu pomernú permeabilitu dostaneme porovnaním permeability vákua s permeabilitou prostredia. Je bezrozmernou skalárnou fyzikálnou veličinou, popisujúcou relatívnu magnetickú polarizovateľnosť (priepustnosť magnetického poľa) prostredia, v ktorom je magnetické pole vytvorené. Táto fyzikálna veličina teda vyjadruje, koľkokrát je dané prostredie magneticky polarizovateľnejšie oproti vákuu. [3] [4]

Pre veľkosť relatívnej permeability prostredia platí:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad [-] \quad (2.9)$$

2.2 Stacionárne magnetické pole

Stacionárne magnetické pole je pole, ktorého vlastnosti sa s časom nemenia, a teda sa nemenia ani jeho silové účinky. Vzniká v okolí:

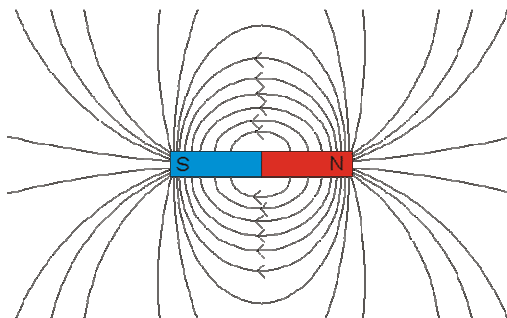
- nepohybujúcich sa permanentných magnetov
- nepohybujúcich sa vodičov, ktorými prechádza ustálený prúd

2.2.1 Magnetické indukčné čiary

Magnetické indukčné čiary sú myslené čiary, pomocou ktorých znázorňujeme magnetické pole. Indukčná čiara je priestorovo orientovaná krivka, ktorej dotyčnica v danom bode má smer osi veľmi malej magnetky umiestnenej v tomto bode. Vychádzajú od severného pólu a späť sa uzatvárajú pólom južným. Nikdy sa nepretínajú a na rozdiel od elektrických siločiar sú vždy uzavreté. Ich priebeh si môžeme ľahko dokázať za pomoci železných pilín.

2.2.2 Magnetické pole tyčového magnetu

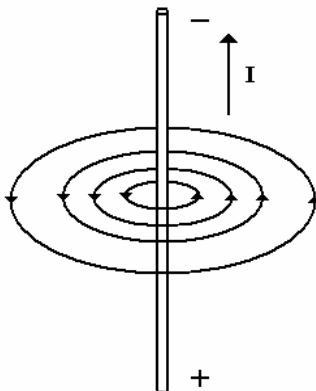
Tyčový magnet je permanentným magnetom. Má dva póly - severný (N) označovaný červenou farbou a južný (S) označovaný farbou modrou. V strede magnetu je tzv. neutrálne pásmo.



Obrázok 2. Indukčné čiary zobrazujúce magnetické pole tyčového magnetu [5]

2.2.3 Magnetické pole priameho vodiča, ktorým preteká prúd

Na jav, že v okolí vodiča s prúdom vzniká magnetické pole, prišiel v roku 1820 Hans Christian Oersted, keď si všimol, že magnet a vodič s prúdom na seba vzájomne pôsobia magnetickou silou. Príčinou vzniku magnetického poľa v okolí vodiča je pohyb nosičov nábojov. Indukčné čiary magnetického poľa majú tvar sústredených kružníc a ich orientácia je závislá na smere tečúceho prúdu. Orientáciu určíme Ampérovým pravidlom pravej ruky - vztýčený palec ukazuje smer prúdu a zvyšné prsty určujú orientáciu indukčných čiar.



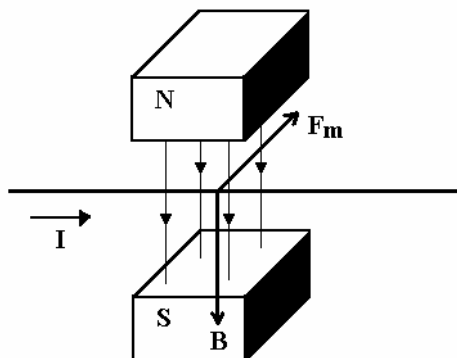
Obrázok 3. Indukčné čiary zobrazujúce magnetické pole vodiča s prúdom

Magnetická sila F_m (Lorenzova alebo Laplaceova)

Magnetická sila pôsobí na aktívnu dĺžku vodiča l nachádzajúceho sa v homogénnom magnetickom poli, ktorým prechádza prúd I . Hodnota sily je priamo úmerná aktívnej dĺžke vodiča, veľkosti prúdu a je závislá na hodnote magnetického poľa a polohy vodiča v ňom. V prípade rovnobežnosti vodiča s indukčnými čiarami je hodnota sily nulová, naopak pri vzájomnej kolmosti dosahuje maximálnej hodnoty. Vzťah pre výpočet magnetickej sily je:

$$F_m = B \cdot l \cdot I \cdot \sin\alpha \quad [A] \quad (2.10)$$

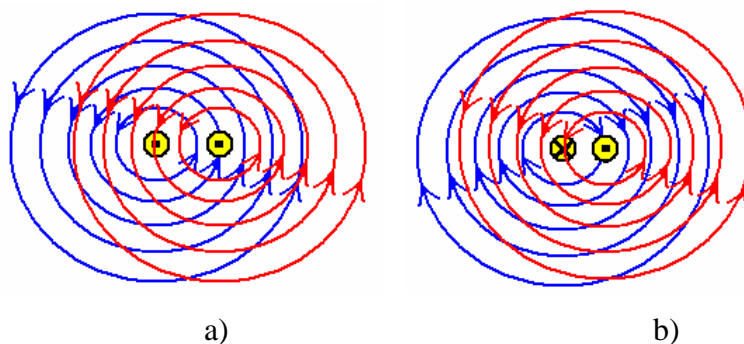
Smer sily určíme Flemingovým pravidlom ľavej ruky – ľavú ruku dáme do magnetického poľa tak, aby indukčné čiary vstupovali do dlane a vystreté prsty ukazovali smer prúdu vo vodiči. Odchýlený palec nám ukazuje smer magnetickej sily pôsobiacej na vodič. [4] [6]



Obrázok 4. Magnetická sila F_m pôsobiaca na vodič v homogénnom magnetickom poli [6]

2.2.4 Magnetické pole dvoch rovnobežných vodičov s prúdom

Pri prechode prúdov dvomi vodičmi, ktorých vzdialenosť d medzi nimi je niekoľkonásobne menšia ako ich dĺžka l , vznikajú magnetické polia, ktoré sa navzájom skladajú. Výsledný tvar poľa je závislý na vzájomnej orientácii prúdov.



Obrázok 5. Indukčné čiary zobrazujúce magnetické pole v okolí dvoch rovnobežných vodičov, ktorými preteká prúd: a) súbežné vodiče, b) protibežné vodiče

Magnetická sila F_m (Lorenzova alebo Laplaceova) pôsobiaca medzi vodičmi

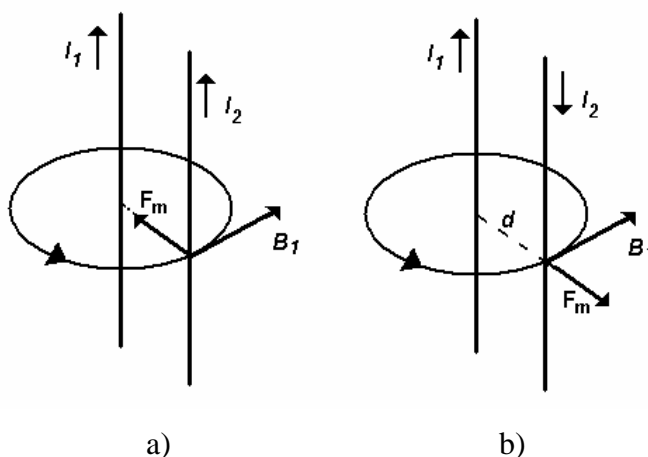
Magnetická sila pôsobiaca medzi vodičmi je závislá na vzájomnej orientácii prúdov I_1 a I_2 . Je úmerná ich násobku, dĺžke vodičov a nepriamoúmerná vzdialenosti d medzi nimi. Vzťah sily medzi vodičmi vypočítame pomocou vzťahu :

$$F_m = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot l \quad [A] \quad (2.11)$$

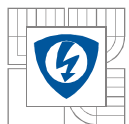
Vzťah je vyjadrením Ampérového zákona a definuje jednotku 1A .

Ampérov zákon

Ampér je stály prúd, ktorý pri prechode dvomi priamymi rovnobežnými nekonečne dlhými vodičmi zanedbateľného prierezu umiestnenými vo vákuu vo vzdialenosti 1 m od seba vyvolá medzi vodičmi silu o veľkosti $2 \cdot 10^{-7}$ N na 1m dĺžky vodiča. [3] [5]



Obrázok 6. Magnetická sila F_m dvoch rovnobežných vodičov s prúdom: a) vzájomne orientovaných, b) opačne orientovaných [6]



2.2.5 Magnetické vlastnosti látok

Magnetické vlastnosti látok sa podľa [4] rozdeľujú na:

1. Diamagnetické

- skladajú sa z diamagnetických atómov, ich relatívna permeabilita je menšia než permeabilita vákua,
- zoslabujú magnetické pole, sú to inertné plyny, zlato, meď, ortuť,
- diamagnetická látka sa od magnetu odpudzuje.

2. Paramagnetické

- skladajú sa z paramagnetických atómov, relatívna permeabilita je nepatrne väčšia než permeability vákua,
- mierne zosilňujú magnetické polia, patrí k nim sodík, draslík, hliník,
- atómy týchto látok majú vlastné magnetické pole, nejde ale dosiahnuť toho, aby všetky atómy mali rovnakú orientáciu magnetických polí, a preto pôsobia proti sebe,
- paramagnetická látka sa k magnetu priťahuje a bude sama priťahovať drobné kovové predmety, ak bude v blízkosti magnet,
- nedajú sa trvalo zmagnetizovať.

3. Feromagnetické

- skladajú sa z paramagnetických atómov, pričom od paramagnetických látok sa líšia ich usporiadaním, ich relatívna permeabilita je podstatne väčšia (10^2 až 10^5) a silne zosilňujú magnetické pole,
- atómy sa ľahko usporadúvajú vonkajším pôsobením a orientácia ich magnetických polí je rovnaká, magnetizácia látky pretrváva aj po skončení vonkajšieho pôsobenia,
- patria k nim železo, kobalt, nikel a ich zliatiny aj feromagnetické látky ferity (zlúčeniny oxidu železa a iných kovov), ktoré nachádzajú uplatnenie v slaboprúdovej elektronike pre ich väčší odpor,
- používajú sa ako jadrá cievok v elektromagnetoch a transformátoroch,
- feromagnetizmus látok je možný len ak sú v kryštalickom stave; ide teda o vlastnosť štruktúry látok a nie atómov; pre každú feromagnetickú látku existuje tzv. Curieova teplota, pri prekročení ktorej stráca látka feromagnetické vlastnosti.

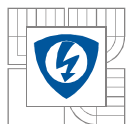
2.3 Nestacionárne magnetické pole

Nestacionárne magnetické pole je pole, ktorého parametre sa menia s časom. Je neustálené, vzniká alebo zaniká. Je charakterizované magnetickou indukciou B , ktorá nemá stály smer ani veľkosť. Je príčinou vzniku elektromagnetickej indukcie. Vzniká v okolí:

- pohybujúcich sa permanentných magnetov
- pohybujúcich sa vodičov, ktorými preteká ustálený prúd
- vodičov, ktorými prechádza neustálený prúd.

2.3.1 Elektromagnetická indukcia

V nestacionárnom magnetickom poli v okolí vodiča (cievky) vzniká elektromagnetické pole, ktoré je charakterizované indukovaným elektromotorickým napätím. Môže byť kladné alebo záporné v závislosti na pohybe pôsobiaceho magnetického poľa. Ak pripojíme k cievke elektrický obvod, začne ním prechádzať indukovaný prúd. Indukované napätie popisuje Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie, ktorý hovorí, že zmenou magnetického

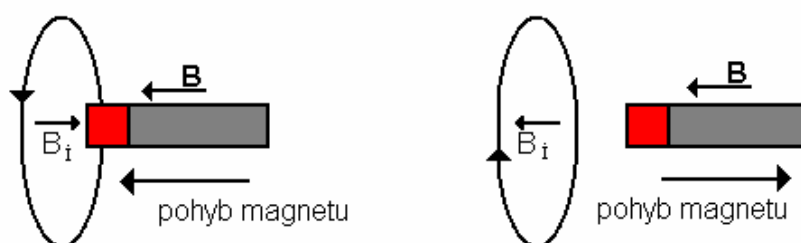


indukčného toku v uzatvorenom vodiči za dobu Δt o $\Delta\Phi$ sa indukuje vo vodiči elektromotorické napätie. Jeho stredná hodnota je daná vzťahom :

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad [\text{V}] \quad (2.12)$$

Indukovaný elektrický prúd je v obvode popísaný Lenzovým zákonom, podľa ktorého smer v uzatvorenom obvode je taký, že magnetické pole vyvolané týmto prúdom pôsobí proti zmene magnetického indukčného toku, ktorá je jeho príčinou. Magnetické pole prúdu znižuje celkové magnetické pole, čím dochádza k zmene indukčného toku plochou. Indukčné prúdy sa nazývajú Foucaultove (vírivé) prúdy a brzdia pohyb vodiča v magnetickom poli. Vo formulácii Faradayova zákona je Lenzov zákon zahrnutý znamienkom mínus. Pre indukovaný prúd platí :

$$I = \frac{U_i}{R} \quad [\text{A}] \quad (2.13)$$



Obrázok 7. Znázornenie pôsobenia magnetickej indukcie vzniknutého indukovaného prúdu proti indukčii zdroja jeho vzniku (Lenzov zákon) [5]

2.3.2 Vlastná indukcia

Ak cievkou prechádza časovo premenný prúd, s časom sa mení magnetické pole cievky aj magnetický indukčný tok, ktorý cievka v sebe vytvára. Dochádza k indukčii elektromotorického napätia. Vzniknutý jav nazývame vlastná indukcia. Ide o prechodný dej, vznikajúci pri zapínaní alebo vypínaní obvodu s cievkou, ktorá sa správa ako zotrvačník. Pri zapnutí obvodu sa v cievke indukuje prúd, ktorý pôsobí proti narastajúcemu prúdu zdroja podľa Lenzovho zákona, čo znamená proti príčine, ktorá ho vyvolala. Pri vypínaní prúdu v obvode prúd klesá spolu s magnetickým tokom v dutine cievky. Dochádza tak k opätovnému indukovaniu prúdu pôsobiaceho proti príčine jeho vzniku.

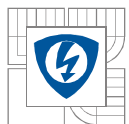
Vlastné magnetické pole vytvorí indukčný tok, ktorý prechádza prierezom cievky a je pri prostredí s konštantnou permeabilitou priamoúmerný prechádzajúcemu prúdu. Indukčný magnetický tok môžeme popísať rovnicou :

$$\Phi = L \cdot I \quad [\text{Wb}] \quad (2.14)$$

kde: L – indukčnosť cievky (parameter cievky) [H]

Pri časovej zmene prúdu ΔI za okamžik Δt sa podľa Faradayova zákona indukuje napätie a na cievke bude mať hodnotu podľa vzťahu :

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [\text{V}] \quad (2.15)$$



3 MAGNETICKÉ SENZORY

Senzory pre meranie magnetického poľa majú veľké uplatnenie v rôznych priemyselných aplikáciách a vo fyzikálnych meraniach. V priemyselnej praxi sa najčastejšie využívajú senzory na meranie priblíženia, polohy alebo otáčok, prúdu, na snímacie hlavy pre čítanie z magnetických záznamových médií, v kompasoch lietadiel atď. Vo fyzikálnej oblasti dosahujú uplatnenie napr. senzory magnetického poľa pre diaľkový výskum Zeme, pre monitorovanie jej geomagnetického poľa a v archeologických výskumoch. Senzory našli veľké uplatnenie aj v lekárstve.

3.1 Spôsoby merania magnetického poľa vo vzduchu

Spôsoby merania magnetického poľa vo vzduchu delíme na:

1. Indukčné metódy
 - indukčná cievka,
 - rotačné a vibračné cievky,
 - feromagnetické sondy (Fluxgate).
2. Magnetogalvanické čidlá
 - Hallova sonda
 - magnetodióda
 - magnetotranzistor
 - magnetoodpor
3. Feromagnetické magnetorezistívne čidlá
4. Vláknové a magnetooptické senzory
5. Rezonančné teslametry
6. Supravodivé magnetometry
7. Metódy založené na silových účinkoch

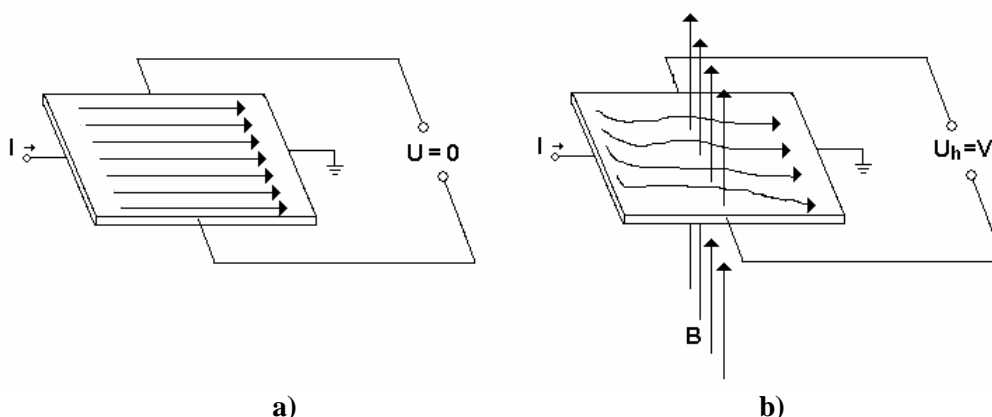
V súčasných aplikáciách pre meranie magnetického poľa sa často preferuje použitie Halloových sond, fluxgate a feromagnetických magnetorezistívnych senzorov. Ďalšie časti práce sa preto budú zaoberať práve nimi. [7]

3.1.1 Hallove senzory

Hallov jav patrí v súčasnosti medzi často využívané princípy merania magnetického poľa. Tieto senzory sa používajú nielen na detekciu prítomnosti magnetického poľa, ale aj na snímanie priblíženia objektu, alebo k snímaniu smeru i rýchlosti pohybu na princípe Hallovho javu.

Hallov jav objavil v roku 1879 Edwin Hall behom pokusu, pri ktorom si všimol, že ak položí magnet kolmo k ploche, ktorou prechádza prúd, objaví sa na bočných stranách plochy rozdielové napätie. Zistil, že toto napätie je úmerné hodnote prúdu, hustote magnetického toku a magnetickej indukcii. Tento jav našiel uplatnenie až po objavení vlastností polovodičov.

Hallov jav spočíva vo vychýľovaní smeru toku elektrického prúdu doštičkou v závislosti na veľkosti magnetickej indukcie magnetického poľa kolmého na polovodičovú doštičku.



Obrázok 8. Smer prúdu Hallovým elementom: a) bez pôsobenia magnetického poľa na element, b) pri pôsobení magnetického poľa na element [8]

Ak Hallovým elementom preteká konštantná hodnota prúdu, čiže nie je vystavený pôsobeniu magnetického poľa, je Hallovo napätie V_H na svorkách nulové. Ak sa objaví magnetické pole, začne pôsobiť na prechádzajúce elektróny Lorenzova sila, ktorá ich vychyluje k jednej strane doštičky. Zmení sa tak rozloženie elektrónov, a teda bočné steny doštičky majú rozdielny potenciál, objaví sa Hallovo napätie V_H .

Magnetické pole sa dá generovať klasickým permanentným magnetom, kedy približovaním a oddľňovaním sa mení veľkosť Hallovho napätia. Ďalšou možnosťou generovania Hallovho napätia je pôsobenie elektromagnetu. Jeho veľkosť ovplyvňujeme zmenou prúdu v cievke.

Veľkosť Hallovho napätia je pri indukci $B = 1\text{ T}$ niekoľko desiatok mV. Meria sa prevažne citlivými milivoltmetrami, ktoré bývajú očiachované priamo v hodnotách magnetickej indukcie. Ich rozsah býva zvyčajne $0,2 - 2\text{ T}$. Pomocou Hallových sond však môžeme merať polia v rozsahu indukcie $10^{-4} - 3\text{ T}$. Vzniknuté Hallovo napätie na doštičke môžeme popísať vzťahom:

$$U_H = R_H \frac{I}{d} \cdot B \quad [\text{V}] \quad (3.1)$$

kde: R_H – Hallova konštanta $[\Omega \cdot \text{m/T}]$
 I – pomocný prúd $[\text{A}]$
 d – hrúbka doštičky $[\text{m}]$
 B – indukcia meraného poľa $[\text{T}]$

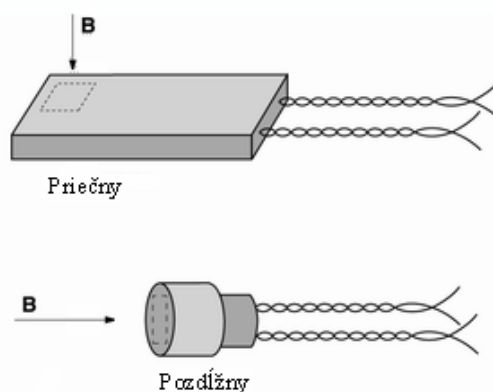
Hallova konštanta je nepriamo úmerná hustote nosičov prúdu, teda pri polovodičoch je jej hodnota značne vyššia ako pri vodičoch. U polovodičov typu P je kladná a typu N záporná.

Hallove sondy bývajú veľmi malých rozmerov (1×2 až $2 \times 4\text{ mm}$ s hrúbkou $0,2$ až $0,4\text{ mm}$). Takéto konštrukčné vyhotovenie umožňuje meranie značne nehomogénnych polí vo vzduchových medzerách jednosmerných strojov a dynám.

Sonda tiež umožňuje zistiť natáčaním doštičky smer vektoru indukcie, pretože meriame jej kolmú zložku. Výhoda sondy spočíva aj v nedeformovaní meraného poľa, keďže sonda neobsahuje feromagnetické súčasti a vplyv budiaceho prúdu, kvôli jeho malým hodnotám (desiatky mA) je zanedbateľný. Umožňujú meranie v blízkosti feromagnetík. Vyhotovenie sondy býva v tenkej sploštenej hliníkovej rúrke spoločne s prívodmi.

Sondy môžu pracovať v širokom rozsahu teplôt, ale ich nevýhodou je teplotná závislosť, ktorú však môžeme kompenzovať. Môžeme pomocou nich merať aj striedavé magnetické polia. Ak má sonda napájanie jednosmerným prúdom, na výstupe dáva striedavé napätie okamžitej hodnoty úmerné okamžitej hodnote indukcie či intenzite magnetického poľa.

Presnejšie Hallove sondy majú striedavé zdroje prúdu a synchronnú detekciu výstupného napätia. Dosiahne sa tým posunutie kmitočtu do oblasti nižšieho šumu a potlačenie vplyvu termoelektrických napätí. [7] [8] [9]



Obrázok 9. Integrované jednočipové senzory založené na Hallovom jave [8]

3.1.2 Fluxgate senzory

Tieto senzory slúžia k meraniu veľmi slabých magnetických polí zväčša tam, kde magnetorezistory a Hallove sondy nedokážu nájsť uplatnenie. Dokážu odmerať magnetickú indukciu v ráde nT až μT . Využívajú nelineárnu magnetizačnú krivku feromagnetického jadra.

Ich základ tvorí toroidné jadro, na ktorom sú navinuté jedna, dve alebo viac cievok. Jedna z cievok je budiaca, ktorá magnetizuje jadro, a ostatné cievky sú snímače, citlivé na meranie vonkajšieho magnetického poľa. Toto usporiadanie sa používa na meranie v jednej osi, ktorá je kolmá na snímacu cievku. V prípade jedno cievkového prevedenia je táto jediná cievka využívaná aj ako budič jadra tak, ako aj snímač. V tomto prípade musia elektronické obvody zaistiť oddelenie budiaceho a nasnímaného signálu. Poprípade už nasnímaný signál zosilniť.

Fluxmeter sa od ostatných magnetoelektrických prístrojov líši tým, že má zanedbateľný direktívny moment, a preto výchylka nie je závislá na momente zotrvačnosti, ale na tlmení. Pretože fluxmeter nemá direktívne pružinky, môže ukazovateľ v klude ukazovať na ľubovoľný diel stupnice. Po privedení napäťového impulzu sa zmení výchylka ukazovateľa úmerne veľkosti napäťového impulzu. Na základe zmeny magnetického toku, ktorá je definovaná veľkosťou impulzu indukovaného napätia, môžeme stanoviť zmenu magnetickej indukcie alebo intenzity meraného poľa.

Meranie sa prevádza tak, že rýchlo zmeníme polaritu prúdu v budiacej cievke, čím zároveň dosiahneme zmenu polaritu magnetického toku $\Delta\Phi = 2\Phi$. Potom veľkosť magnetickej indukcie je daná vzťahom:

$$B = \frac{k_F}{2SN} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (3.2)$$

kde: k_F – konštanta fluxmetra

S – plocha meracej cievky

N – počet závitov meracej cievky

α_1 – konečná výchylka fluxmetra

α_0 – počiatočná výchylka fluxmetra

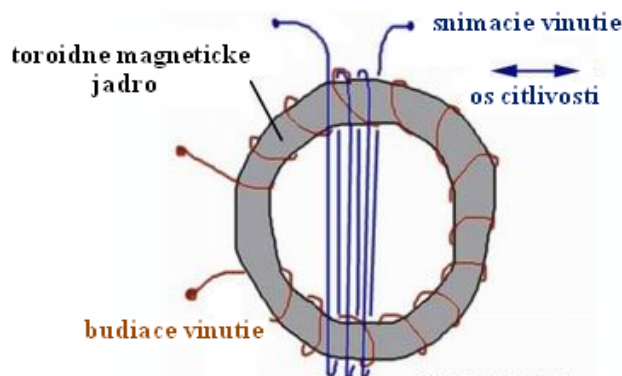
Pre intenzitu magnetického poľa platí:

$$H = \frac{k_F}{2\mu_0 SN} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (3.3)$$

V prípade, že nie je možné dosiahnuť zmenu magnetického toku za pomoci komutácie prúdu v cievke, ktorá je zdrojom magnetického poľa, môže sa zmena dosiahnuť tromi spôsobmi:

- vzdialením cievky z poľa $\Delta\Phi = \Phi$
- zrušením poľa $\Delta\Phi = \Phi$
- otočením meracej cievky o uhol 180° $\Delta\Phi = 2\Phi$

Výhodou fluxmetra je možnosť merania dlhšie trvajúcich napäťových impulzov. Podmienkou však je malý odpor, teda malý počet závitov. Táto nevýhoda sa v súčasnosti odstraňuje elektronickým webermetrom, čo umožňuje pripojenie cievky s veľkým počtom závitov. Nevýhodou je vysoká cena a citlivosť na termoelektrické napätie. V súčasnosti je ich použitie pre meranie magnetických polí najčastejšie.



Obrázok 10. Skica základného usporiadania najjednoduchšieho fluxgate senzora [10]

Fluxgate senzory nachádzajú uplatnenie napríklad v elektronických kompasoch, navigačných zariadeniach, pri meraní slabých magnetických polí v lietadlách, skúmaní geomagnetického poľa zeme, detekcii silového magnetického poľa od silového vedenia a meraní vzdialenosti. [9][10]

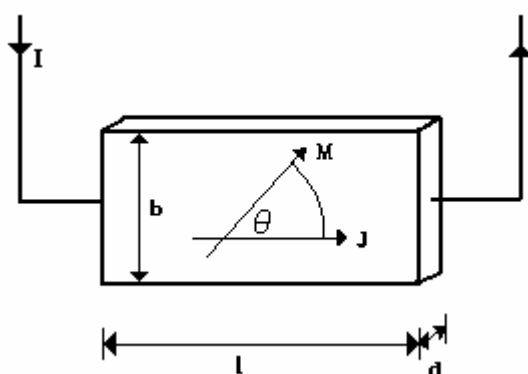


Obrázok 11. Príklad prevedenia niektorých komerčných fluxgate senzorov a snímačov [10]

3.1.3 Feromagnetické magnetorezistívne čidlá (AMR)

Feromagnetické senzory využívajúce feromagnetický jav vo feromagnetických materiáloch. Svojou citlivosťou ich zaradujeme medzi Hallove a fluxgate sondy. Ich výhodou je cena, ľahkosť, spoľahlivosť a integrácia do klasických SMD puzdiel. Ich rozmach nastal pri využívaní ako čítacích hláv pre pevné disky počítačov. Je ich možné použiť aj v lineárnych oblastiach merania magnetických polí, kde AMR (anizotropné magnetorezistory) dosahujú v súčasnosti najlepších parametrov.

Sú založené na anizotropnom magnetorezistívnom jave, ktorý sa prejavuje najmä v tenkých feromagnetických vrstvách (používa sa PY – permalloy). Princíp je založený na tom, že tenký prúžok PY vykazuje výraznú magnetickú anizotropiu s ľahkou osou prúžka v pozdĺžnom smere, ktorým preteká aj elektrický prúd. Odpor je závislý na vzájomnom uhle, ktorý zvierá prúd s magnetizáciou prúžka. V prípade pôsobenia vonkajšieho poľa dôjde k vychýleniu magnetizácie z pozdĺžneho smeru osi prúžka, a tým sa zmení jeho odpor. Najväčší odpor je dosiahnutý pri vzájomnej rovnobežnosti prúdu a magnetizácie a naopak, ak prúd a magnetizácia prúžka zvierajú kolmý uhol.



Obrázok 12. Anizotropný magnetorezistívny jav vo feromagnetickom prúžku [11]

Ideálnym prípadom je, ak magnetorezistor obsahuje jednu magnetickú doménu magnetovanú do saturácie, keď pôsobením vonkajšieho poľa dochádza len k rotácii tejto domény. Merané pole sa preto aplikuje v kolmom smere s osou prúžku, čo spôsobuje vychýľovanie magnetizácie až do stavu kolmého s osou. Pre rezistivitu prúžku pred saturáciou platí vzťah:

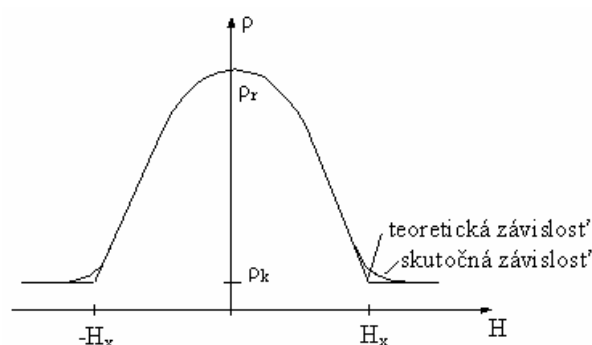
$$\rho_x = \rho_r - \Delta\rho \cdot \frac{H^2}{M^2} \quad [\Omega.m] \quad (3.4)$$

kde: ρ_r – rezistivita v smere vektoru magnetizácie

$\Delta\rho$ – rozdiel najväčšej a najmenšej rezistivity

H – pôsobiace pole

M – magnetizácia prúžku



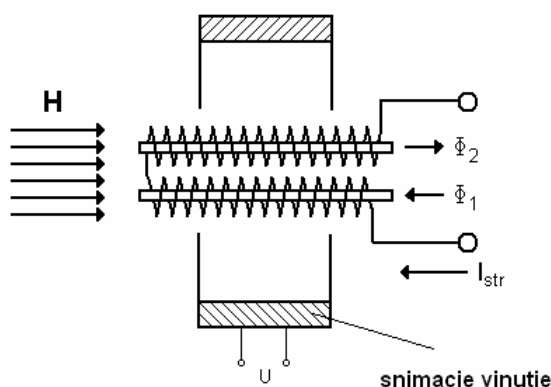
Obrázok 13. Závislosť rezistivity anizotropného magnetorezistoru na veľkosti pôsobiaceho poľa v kolmom smere podľa (vzťahu 2.4) [11]

kde: H_x – pôsobiace pole v pozdĺžnom smere

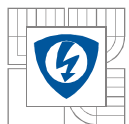
ρ_k – rezistivita pri nulovej pozdĺžnej zložke magnetizácie

Charakteristika je silne nelineárna a párna, nemôžeme preto rozlíšiť orientáciu pôsobiaceho poľa. Nevýhoda sa odstraňuje pomocou "Barber Poles" štruktúry, kedy sa na povrch štruktúry PY prúžku deponujú hliníkové pásy pod uhlom 45° vzhľadom k pozdĺžnej osi. Dochádza k posunu kludového pracovného bodu senzoru, kde má charakteristika veľký sklon, čo má za následok veľkú citlivosť. Podľa znamienka rezistivity potom môžeme určiť orientáciu poľa. Výhodou je aj výrazná linearizácia charakteristiky senzoru.

V priemyselnej výrobe senzorov sa zhotovujú dva rovnaké páry komplementárnych PY prúžkov, na ktorých sú navinuté cievky s rovnakým počtom závitov, tak aby ich účinky mali opačný zmysel.



Obrázok 14. Princíp činnosti feromagnetického magnetorezistívneho senzoru [9]



Cievky sú napájané striedavým prúdom o frekvencií niekoľkých kHz a vytvoria dve rovnako, veľké proti sebe pôsobiace magnetické polia. To má za následok, že do snímacieho vinutia sa nič nenaindukujú a výstupné merané napätie je nulové.

Ak vložíme sondu do magnetického poľa s intenzitou H podľa obrázka, dochádza pôsobením tohto vonkajšieho poľa k zvýšeniu magnetického toku Φ_2 a zníženiu toku Φ_1 . Rovnováha magnetického toku jadier sa poruší a v snímacom vinutí sa naindukujú napätie úmerné intenzite vonkajšieho poľa. Priama úmernosť medzi intenzitou magnetického poľa a indikačným napätím nastane pri malých hodnotách intenzity poľa. Pri väčších hodnotách intenzity sa využívajú kompenzačné sondy, pretože PY jadra sa presycujú a veľkosť indukovaného napätia klesá.

Veľkosť meraného magnetického poľa sa kompenzuje poľom kompenzačnej cievky, ktorá je napájaná jednosmerným prúdom. Feromagnetická sonda potom slúži ako nulový indikátor určujúci stav, kedy sa obidve polia vzájomne vylučujú. Hodnota prúdu kompenzačnej cievky sa stáva úmernou hodnote intenzity meraného magnetického poľa.

V súčasnej dobe sú najmodernejšie magnetorezistívne sondy navinuté z jedného jadra magneticky mäkkého materiálu Permalloy. Výhodou takejto konštrukcie je väčšia súmernosť, čo napomáha zníženiu rušivých napätí na výstupe a zníženiu rozptylového poľa sondy.

Magnetorezistívne sondy umožňujú merať slabé magnetické polia o intenzite 10^{-6} A/m. Pre svoju veľkú citlivosť sa používajú napr. pri geologickom prieskume, meraní variácií magnetického poľa Zeme a kompasoch lietadiel.

Nevýhoda je v ovplyvňovaní meraného poľa feromagnetickým jadrom a potrebného zložitého zariadenia na filtráciu. [9] [11]

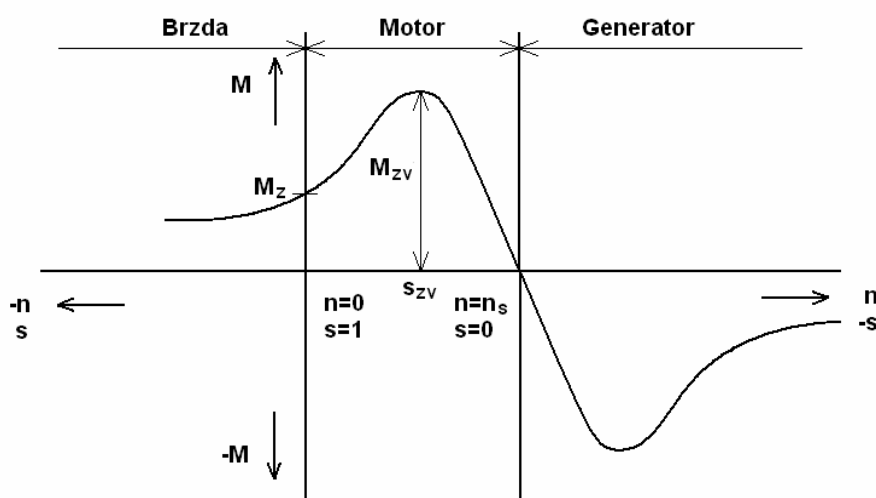
4 ASYNCHRÓNNY MOTOR

Princíp činnosti asynchrónneho motora je založený na vzájomnom elektromagnetickom pôsobení točivého magnetického poľa statoru a prúdov vytvorených v rotorovom vinutí týmto magnetickým poľom. Princíp je teda založený na indukcii napätia a prúdu v rotore, a preto sa tiež nazýva aj indukčný motor. Točivé magnetické pole je vytvárané vo vinutí na strane statoru (tvorí ho pevná, nepohyblivá časť). Podľa indukčného zákona sa môžu v rotore indukovať napätia a prúdy točivým magnetickým poľom, len ak otáčky rotora sú menšie ako otáčky tohto poľa. Ak by sa rotor otáčal synchronnými otáčkami, neindukovalo by sa v ňom napätie, nepretekali prúdy a mal by nulový moment.

Pri rozbehu asynchrónneho motora sa v stojacom rotore indukujú napätia, ktoré v uzatvorenom obvode vyvolávajú prúdy, čím dochádza k silovému pôsobeniu statoru na rotorový obvod. Smer a orientácia vzniknutej sily sa určuje použitím Flemingovho pravidla ľavej ruky. Pôsobenie týchto síl má za následok vznik točivého momentu k roztočeniu rotora v zmysle točenia magnetického poľa statoru. Elektrická energia sa premieňa na mechanickú a stroj pracuje ako motor.

Asynchrónny motor môže pracovať ako:

- brzda,
- motor,
- generátor.

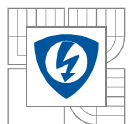


Obrázok 15. Momentová charakteristika asynchrónneho stroja

Otáčky asynchrónneho motora sa udávajú za minútu a vypočítame ich podľa vzťahu:

$$n = n_s \cdot (1 - s) \quad [\text{min}^{-1}] \quad (4.1)$$

kde: n_s – synchronné otáčky stroja [min^{-1}]
 s – sklz [-]



Pre synchronné otáčky stroja platí:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (4.2)$$

kde: f_1 – frekvencia na statore (napájacia) [Hz]
 p – počet pólových dvojíc [-]

Sklz vyjadruje mieru asynchronizmu stroja, tzn. rozdiel synchronných otáčok a otáčok rotora. Zvykne sa vyjadrovať v percentách a vypočítame ho podľa vzťahu:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.3)$$

Indukované prúdy v obvode rotora majú tiež za následok vytvorenie točivého magnetického poľa rotora, ktoré sa vzhľadom k rotoru otáča rýchlosťou danou vzťahom:

$$n_2 = n_s - n = \frac{f_2}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (4.4)$$

kde: f_2 – je frekvencia napätia a prúdu vo vinutí rotora

$$f_2 = n_2 \cdot p = (n_s - n) \cdot \frac{f_1}{n_s} = s \cdot f_1 \quad [\text{Hz}] \quad (4.5)$$

Rozdelenie asynchronných motorov:

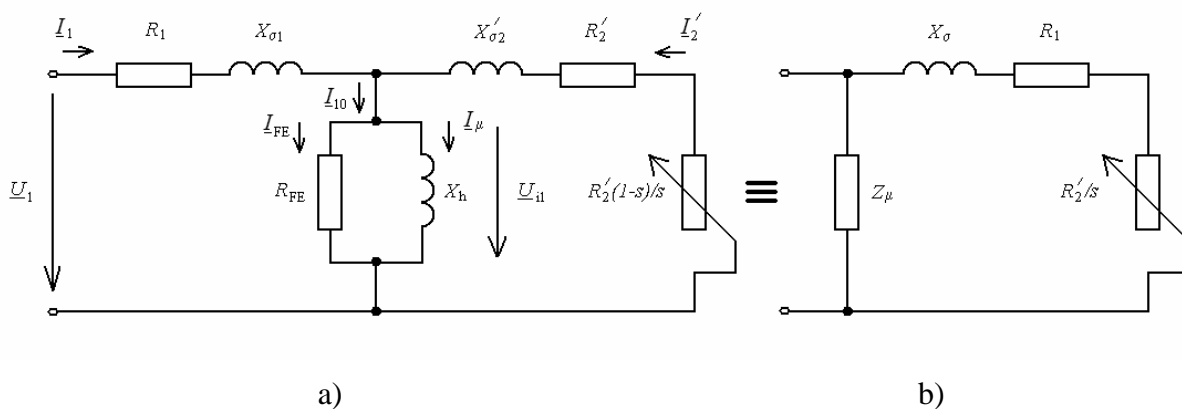
1. Podľa počtu fázy statorového vinutia
 - trojfázové,
 - dvojfázové,
 - jednofázové.
2. Podľa zhotovenia rotorového vinutia
 - s kotvou nakrátko (rotorová klietka),
 - s kotvou krúžkovou.

Zapojenie trojfázového statorového vinutia

Stroje bývajú najčastejšie konštruované ako trojfázové. Vinutie je uložené v drážkach magnetického obvodu statora zloženého zo vzájomne izolovaných plechov. Jeho šesť koncov je vyvedených na svorkovnicu, kde začiatky vinutí sú označené U1, V1, W1 a konce U2, V2, W2. Vinutie sa spája pomocou vodivých spojok buď do hviezdy (Y), alebo do trojuholníka (D).

Náhradná schéma asynchronného motora

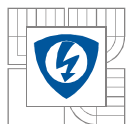
Náhradná schéma asynchronného motora má veľký význam pri rozbere práce stroja, kedy umožňuje názorne stanoviť závislosti medzi veličinami, ktoré charakterizujú jednotlivé stavy stroja.



Obrázok 16. Náhradná schéma asynchrónneho motora: a) úplná, b) neúplná

Asynchrónny motor môže pracovať v stavoch:

- naprázdno $s \rightarrow 0$,
- nakrátko $s=1$,
- pri zaťažení $s=(0 \div 1)$.



5 FEMM (FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS)

Program je využívaný pri riešení problémov v oblasti elektrostatiky a elektromagnetizmu. Princíp je založený na metóde konečných prvkov v 2D. K programu od verzie 4.2 je pridružený produkt Mirage, ktorý je určený na riešenie tepelných úloh a zväčšuje tak možnosti využitia programu.

Metóda konečných prvkov (MKP) je numerická metóda slúžiaca k simulácii priebehov napätí, deformácii, vlastných frekvencií, prúdenia tepla, javov elektromagnetizmu, prúdenia tekutín atď. na vytvorenom fyzikálnom modeli. Princíp spočíva v diskretizácii spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvkov, pričom zisťované parametre sú určované v jednotlivých uzlových bodoch. MKP sa používa predovšetkým pre kontrolu už navrhnutých zariadení, alebo na stanovenie kritického (najnamáhanejšieho) miesta konštrukcie. K masovému používaniu tejto metódy došlo s nástupom modernej výpočtovej techniky.

FEMM je voľne dostupný na internete a predstavuje kvalitnú náhradu za platené programy, ako napr. QuickField. Užívateľ nie je obmedzený počtom použitých elementov a tak riešený model môže byť opatrený ľubovoľne jemnou matematickou sieťou. Program podporuje platformy Windows 95/98/NT, GNU/Linux.

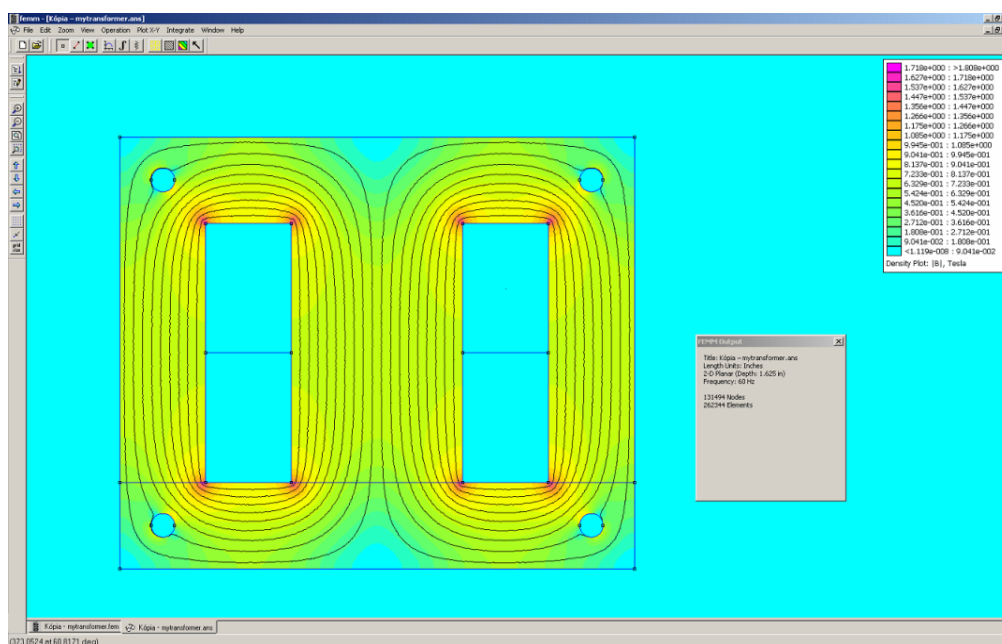
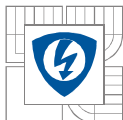
FEMM umožňuje kreslenie 2D modelu, ale jeho kresliace schopnosti sú na nízkej (komplikovanej) úrovni a pri riešení zložitejších modelov je jediným východiskom možnosť importovania súborov vo formáte *.dxf (napr. z programu AutoCad alebo QCad).

K výhodám FEMMu patrí taktiež podpora otvoreného skriptovacieho jazyka Lua, s ktorého pomocou ide automatizovať radu operácií prevádzaných programom.

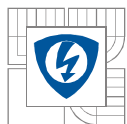
FEMM obsahuje:

- **Prípravný blok (preprocessor)**, t.j. CAD program slúžiaci pre kreslenie tvaru riešeného problému, definovaniu materiálových vlastností a hraničných podmienok.
- **Blok riešenia (solver)**, ktorý spĺňa preberanie dátových súborov, ktoré popisujú riešený problém a rieši ich pomocou Maxwellových rovníc. Výsledkom je elektrostatické alebo magnetické pole v oblasti riešenia.
- **Blok spracovania výsledkov (postprocessor)**, v ktorom dochádza ku grafickému spracovaniu výpočtov prostredníctvom siločiar alebo indukčných čiar a máp rozloženia poľa. Pole môže užívateľ skúmať v rôznych bodoch, vyhodnocovať radu integrálov.

[12] [13]



Obrázok 17. Ukážka prostredia programu FEMM



6 MERANIE MAGNETICKÉHO POĽA NA ASYNCHRÓNOM MOTORE

Cieľom merania bolo premerať magnetické pole v okolí asynchrónneho motora a získané výsledky spracovať vo forme grafických závislostí, kvôli znázorneniu rozloženia magnetického poľa na danom motore.

Pre meranie bola zvolená Hallová sonda, ktorá dostatočne vyhovuje svojim rozsahom a taktiež umožňuje merať striedavé magnetické polia. K meraniu som použil prístroj od firmy F.W. Bell, model 7030 Gauss/Teslameter. Model 7030 je trojkanálový, schopný súčasne merať a zobrazovať sedem rôznych parametrov na kanál – hustotu prúdu, frekvenciu, teplotu, min, max, špičku a minimum. Sonda poskytuje teplotnú kompenzáciu pri monitorovaní magnetického poľa v rozsahu teplôt od -40°C do $+100^{\circ}\text{C}$. Rozsah aplikovania sondy je od základného magnetického merania až po citlivé komplikované trojosové merania vyžadujúce sčítavanie vektorov.

Funkcie prístroja Gauss/Teslameter 7030:

- jasný 1/4-VGA výstup,
- veľký elektroluminiscenčný grafický displej,
- viac ako 100 štandardných sond k dispozícii,
- automatická korekcia koeficientu sondy,
- zobrazenie v Gauss, Tesla, Amp / meter alebo Oe,
- relatívny režim,
- plne riadený pomocou menu pre jednoduchú obsluhu,
- automatická kalibrácia,
- IEEE-488 a RS-232 rozhranie,
- komplexná technická podpora.

Magnetické pole bolo snímané na asynchrónnom motore. Plášte motorov sa vyrábajú zväčša z liatiny alebo oceľových materiálov. Tie zabezpečujú dostatočné tienenie a preto sa do okolia vyžaruje nepatrné magnetické rušenie. Z tohto dôvodu bol použitý asynchrónny motor, vyrobený ako pokusná vzorka spoločnosťou EMP s.r.o Slavkov u Brna. Plášť motora je z hliníkového materiálu a tak dosahuje slabé magnetické tienenie, čo je pre účel merania rozloženia magnetického poľa v jeho okolí vyhovujúce. Statorové vinutie je trojfázové jednovrstvové a obsahuje 68 závitov, rotorové vinutie je v prevedení nakrátko. Rozmery meraného motora 10x17,5x10 cm. Namerané parametre daného asynchrónneho motora:

$$3 \times 230\text{V (zapojenie do Y)}, P_n = 200\text{W}, n = 970 \text{ min}^{-1}, I_n = 1,2\text{A}$$

Pri meraní bol použitý aj multimeter METEX M-3630.



Obrázok 18. Zobrazenie asynchrónneho motora a prístrojov na pracovisku

Popis merania

Magnetické pole bolo merané pri napájaní motora združeným napätím $U = 200\text{V}$, prúdom $I = 0,44\text{A}$ a pri chode naprázdno. Pred meraním bolo potrebné vytvoriť sieť bodov, v ktorých bola meraná hodnota indukcie. Meranie bolo prevádzané na troch plochách plášťa motora (vrchná plocha, predné a zadné čelo). Pred použitím sondy bol prístroj prepnutý pre meranie striedavého magnetického poľa a každá os sondy skalibrovaná magnetickým tienení.

Pri magnetickom tienení sa sonda umiestnila do magnetického tienidla a využila sa funkcia meracieho prístroja *Zero*. Pri meraní sa sonda nanášala na jednotlivé vyznačené miesta na ploche motora s prihliadaním na zhodnosť osi sondy, ktorú určovala jej orientačná ryska. Display prístroja zobrazoval hodnoty indukcie v jednotkách mT pre každú os a tiež jej výsledný vektor. Namerané hodnoty týchto indukcií boli ručne zapisované do tabuľky.

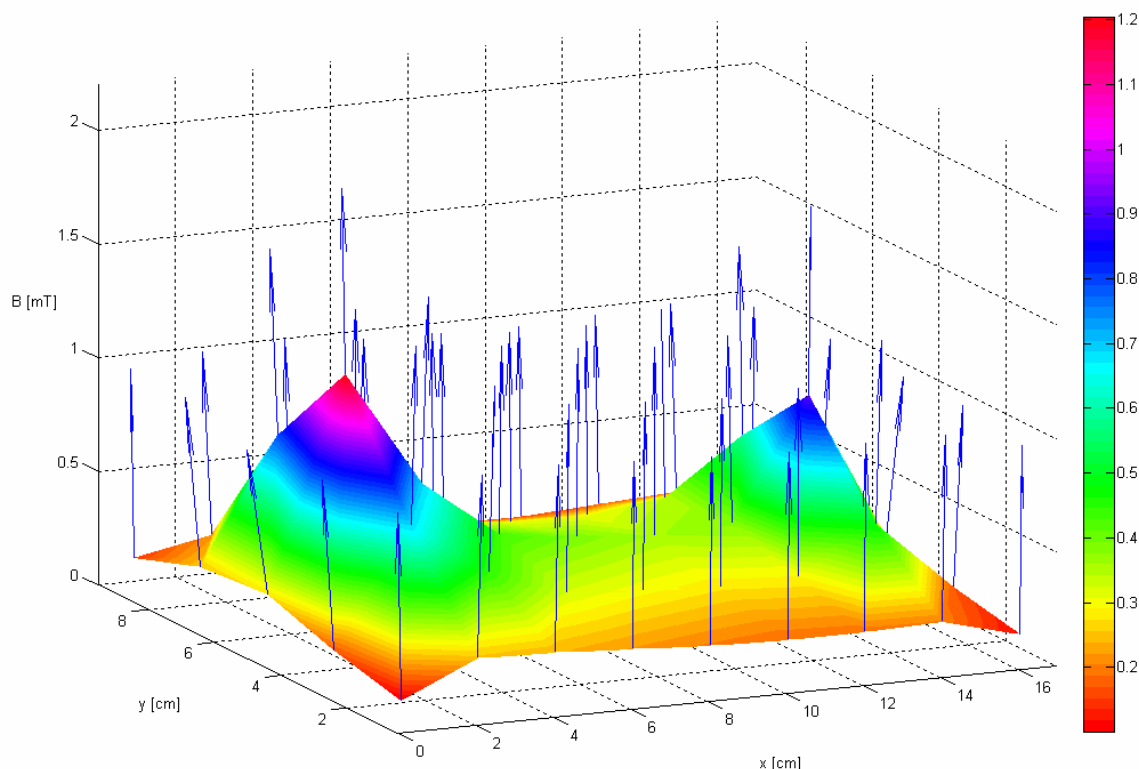
Kvôli konštrukcii asynchrónneho motora, kde chladenie je zabezpečené iba sálaním, dochádzalo k rýchlemu prehrievaniu motora. Z dôvodu možného poškodenia motora vysokou teplotou bol preto motor meraný na tri krát a v stave naprázdno, kedy ním preteká menší prúd.

Grafické spracovanie nameraných hodnôt

Namerané hodnoty boli spracovávané pre celé plochy na povrchu motora pomocou programu *Matlab*. Výsledkom sú 3D grafické znázornenia, ktoré mapujú rozloženie magnetického poľa na motore. Veľkosť úrovne hodnôt indukcie je v grafe farebne odlíšena a smer výsledného vektora indukcie v danom bode znázornený šípkami.

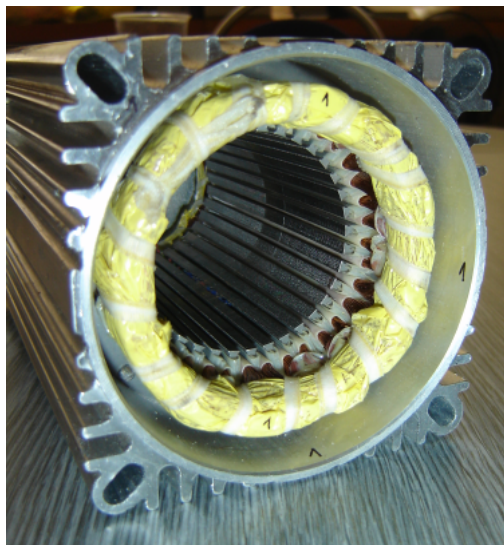
Namerané hodnoty boli taktiež graficky spracované v programe *Excel* v podobe 2D grafov, pre stredné osi meraných plôch. V týchto grafoch sú porovnané veľkosti jednotlivých zložiek indukcie (x , y , z), dopočítanej a tiež výslednej indukcie prístroja v závislosti na dĺžke osi motora.

Analýza vrchnej plochy plášťa asynchrónneho motora

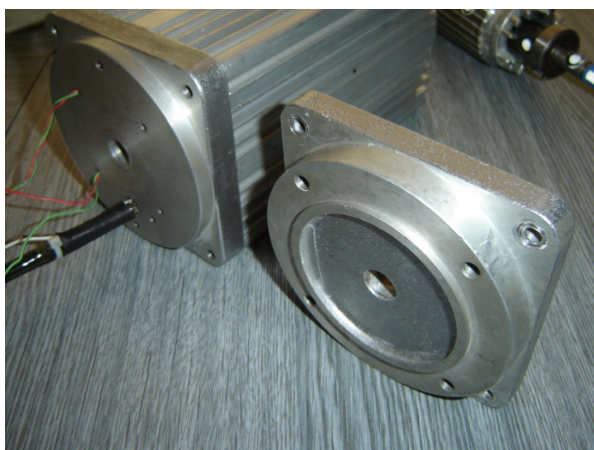


Graf 1. Grafické 3D spracovanie výsledných indukcií prístroja nameraných na vrchnej ploche plášťa asynchrónneho motora

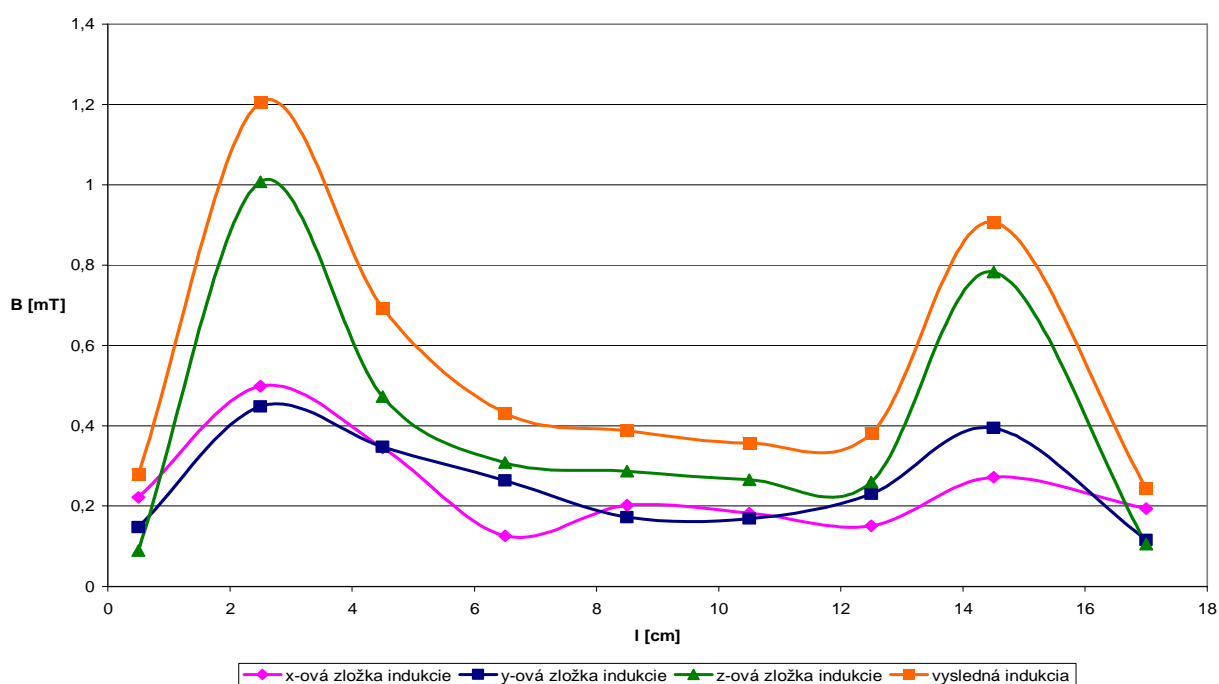
Z grafického 3D rozloženia magnetického poľa na vrchnom povrchu motora je zrejmé, že indukcia dosahuje najväčších hodnôt v strede motora. Je to dané kruhovým tvarom statorového a rotorového vinutia. Veľkosti nameraných hodnôt indukcií teda úmerne klesajú s narastajúcou sa vzdialenosťou vinutí od povrchu motora. V krajných oblastiach plochy vykazujú indukcie najmenšie hodnoty. Rozdielných hodnôt sa dosahuje aj v pozdĺžnej osi povrchu motora, kde najväčšie hodnoty indukcií boli namerané v miestach nad čelami vinutí. Čelá nie sú uložené v drážkach statora, ale vo vzduchu (viď. obrázok 19). Povrch je preto nad čelami motora nasýtenejší a magnetické pole v jeho okolí väčšie. Veľkosti indukcií nad predným a zadným čelom sa líšia. Je to spôsobené rozdielnym konštrukčným vyhotovením čelných plôch plášťa asynchrónneho motora znázornených na obrázku 20.



Obrázok 19. Konštrukčné vyhotovenie statora daného asynchrónneho motora

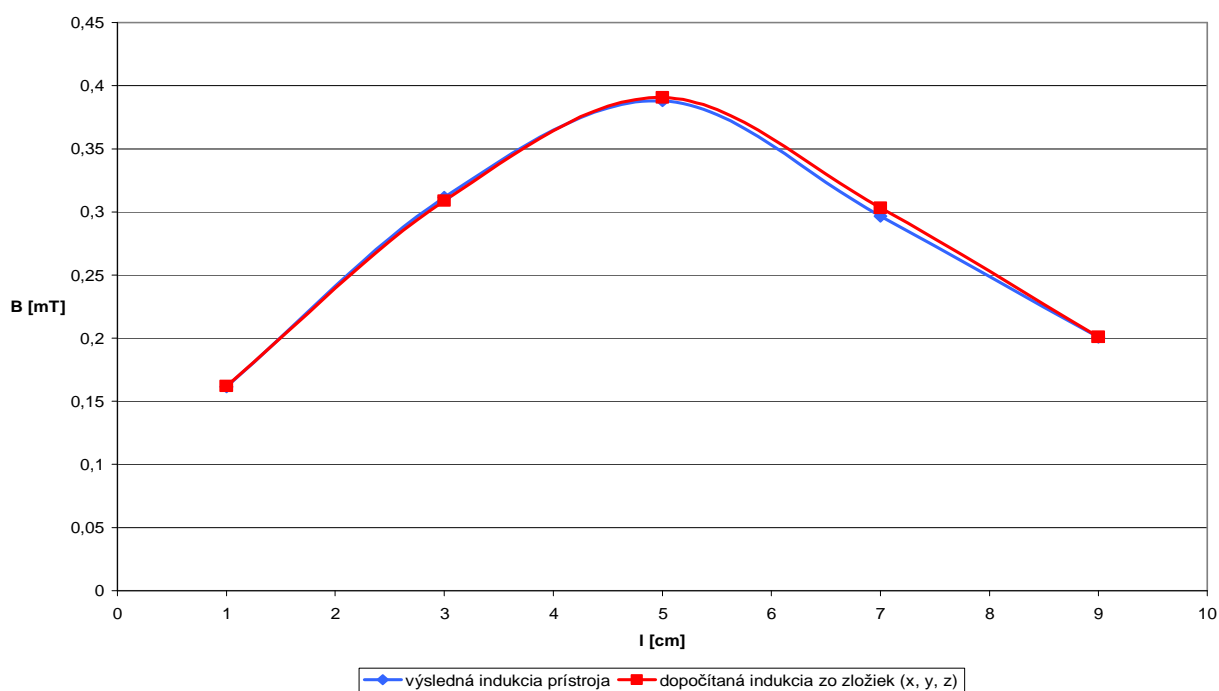


Obrázok 20. Konštrukčné prevedenie zadného a predného čela daného asynchrónneho motora



Graf 2. Grafické spracovanie zložiek výslednej indukcie (x, y, z) v pozdĺžnej strednej osi vrchného povrchu plášťa motora v závislosti na vzdialenosti

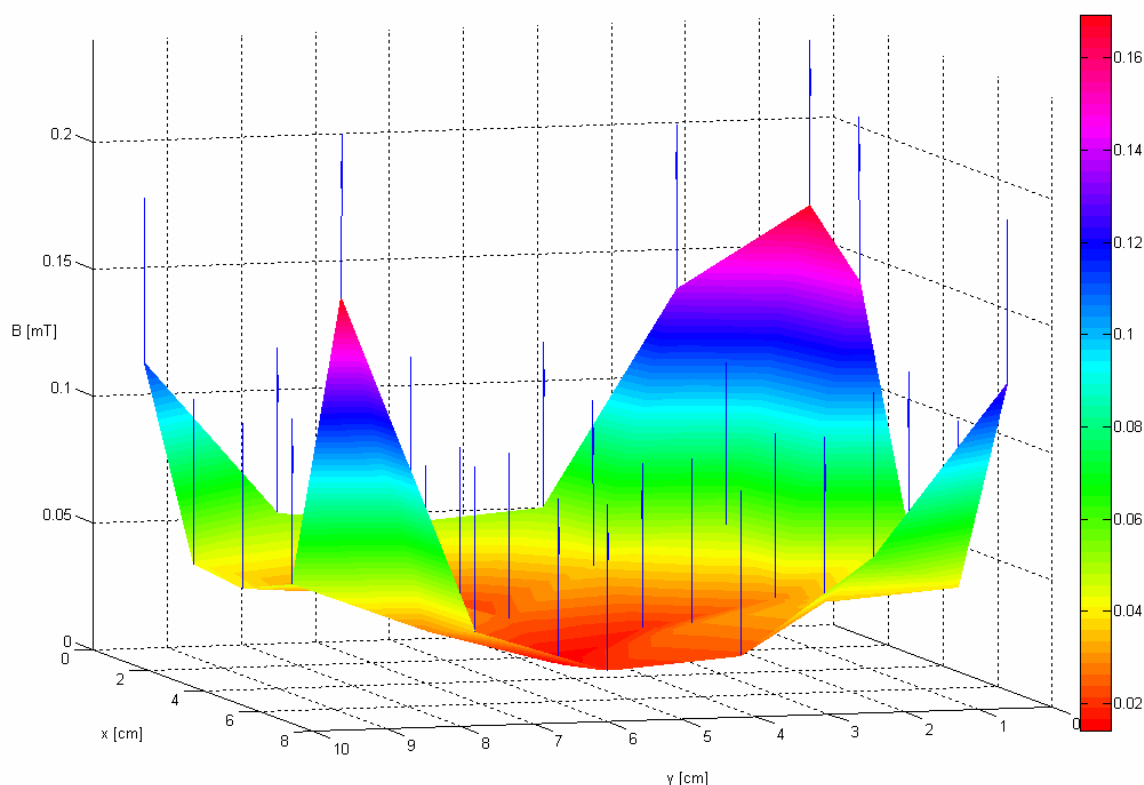
Grafický priebeh zložiek indukcie (x, y, z) v pozdĺžnej strednej ose povrchu plášťa motora znázorňuje (podobne ako pri 3D grafickom spracovaní), že v mieste povrchu plášťa nad čelami vinutí je magnetické pole najväčšie. Spomedzi zložiek indukcie má rozhodujúci vplyv pre výsledný tvar magnetického poľa z-ová zložka indukcie. Dosahuje najväčších hodnôt indukcií. Je to dané tým, že jej smer bol kolmý k orientácii Hallovej sondy meracieho prístroja.



Graf 3. Priebeh výslednej indukcie prístroja a dopočítanej indukcie z jednotlivých zložiek (x, y, z) v priečnej ose vrchnej plochy plášťa motora

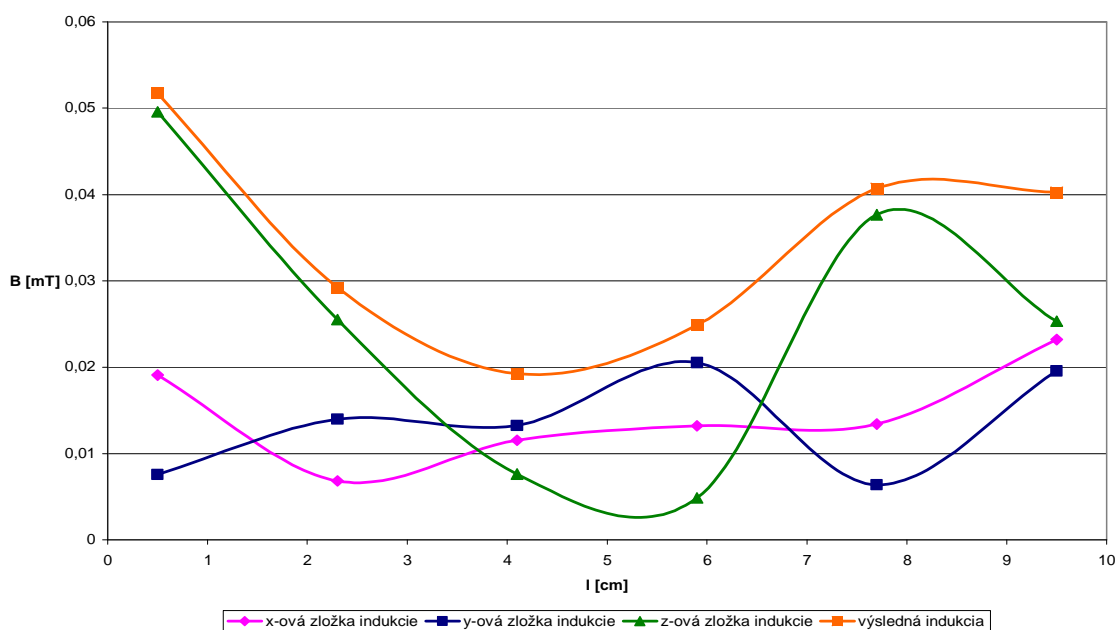
Najväčšie namerané hodnoty boli v strede motora. Vinutie bolo v týchto miestach najbližšie k miestu snímania na povrchu plášťa. Pokles zmeraných hodnôt k okrajom plôch je daný vzdialenosťou vinutí od povrchu plášťa. Oba priebehy majú približne rovnaký tvar. Odchýlky boli spôsobené rozdielnym okamihom odčítania hodnôt z displeja. Odčítaná hodnota výslednej indukcie prístroja je však považovaná za presnejšiu vzhľadom k tomu, že pre každú os boli hodnoty indukcie odčítané opäť v inom okamihu. Pri výpočte chyby metódy dopočítania indukcie sa preto pokladá za vzťažnú hodnotu. Percentuálny rozdiel celkových indukcií je vyjadrený v tabuľke 2 (viď. príloha A).

Analýza prednej plochy plášťa asynchrónneho motora



Graf 4. Grafické 3D spracovanie výsledných indukcií prístroja nameraných na prednej ploche plášťa asynchrónneho motora

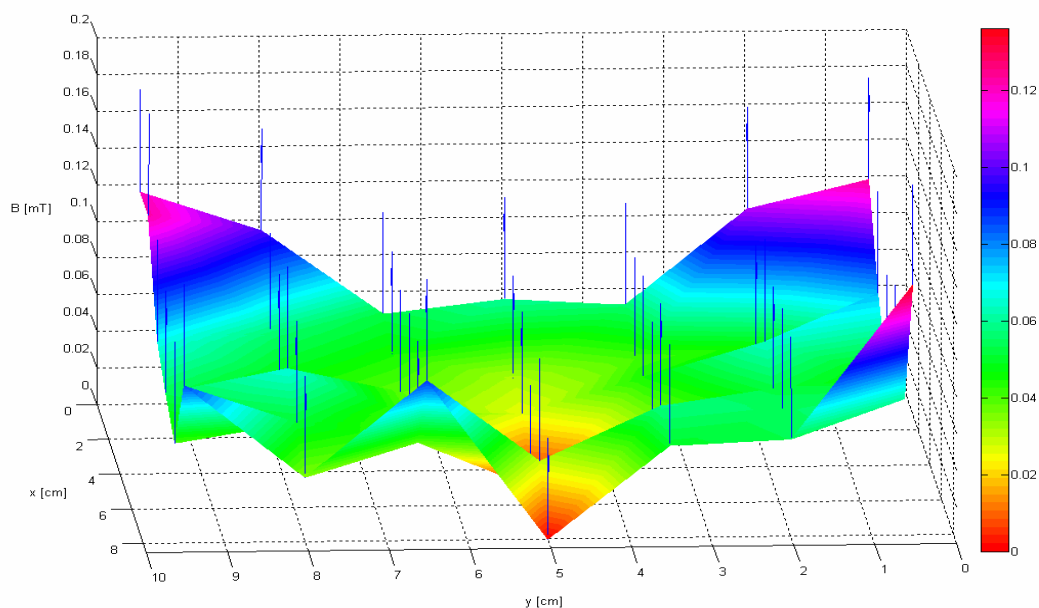
Magnetické pole zmerané na prednom čele motora, bolo spôsobené hlavne rozptylovým magnetickým tokom predného čela vinutia. Magnetické pole vykazovalo najmenšie hodnoty v strednom bode plochy. Bolo to spôsobené širším plášťom a polohou stredného bodu voči čelu vinutia. Stredný bod plochy vzhľadom k čelu vinutia bol najvzdialenejší. V krajných rohoch plochy bola nameraná najväčšia indukcia, pretože predný plášť v týchto miestach je tenší (viď. na obrázku 20 vpravo).



Graf 5. Grafické znázornenie výslednej indukcie a jej zložiek (x, y, z) v horizontálnej ose vzdialenej 9 mm od strednej osi predného plášťa motora v závislosti na vzdialenosti.

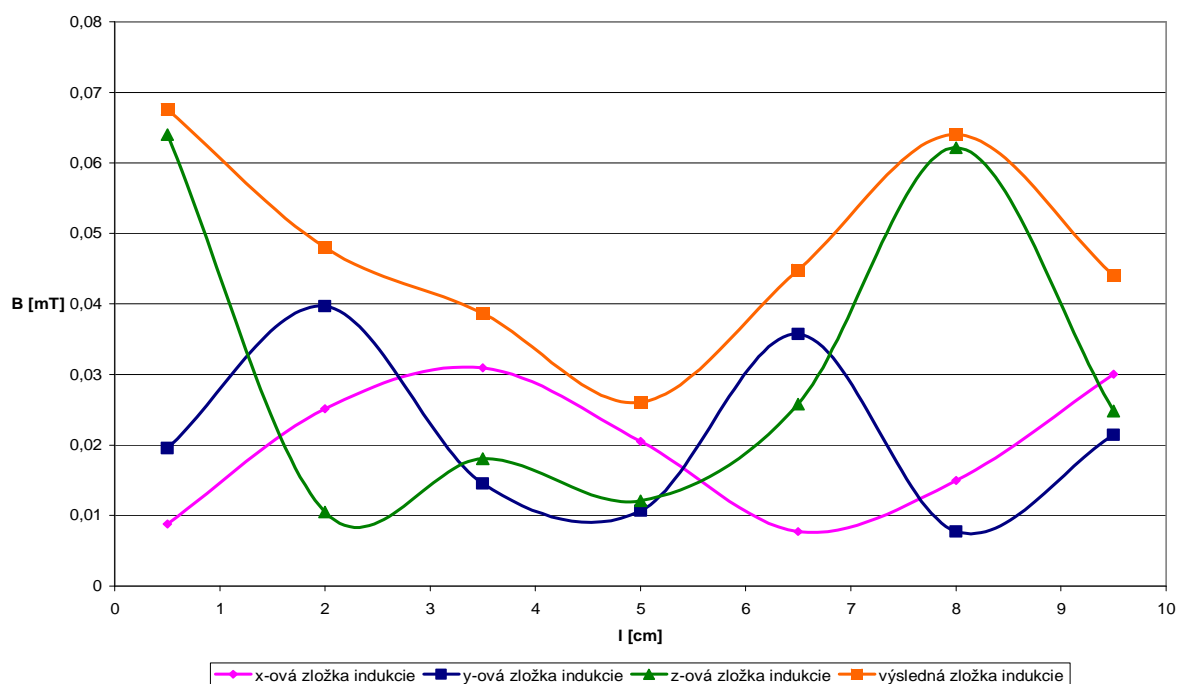
Spomedzi zložiek indukcie (x, y, z) dosahuje z-ová zložka najväčších hodnôt. V určitých miestach v porovnaní s ostatnými zložkami dosahuje viac ako dvojnásobných hodnôt. Preto výsledná indukcia takmer kopíruje jej priebeh. Najväčších hodnôt sa dosiahlo pri krajoch predného čela motora vzhľadom k menšej hrúbke plášťa. Nesúmernosť výslednej aj z-ovej krivky indukcie na krajoch čela je spôsobená tým, že zobrazená horizontálna os predného čela bola posunutá oproti stredovej osi o 9 mm. Tým na krajoch čela mali voči sebe odpovedajúce si vinutia jednej fázy odlišnú polohu. To má za následok rozdielne hustoty indukčných čiar v daných krajných bodoch.

Analýza zadnej plochy plášťa asynchrónneho motora



Graf 6. Grafické 3D spracovanie výsledných indukcií prístroja nameraných na zadnej ploche plášťa asynchrónneho motora

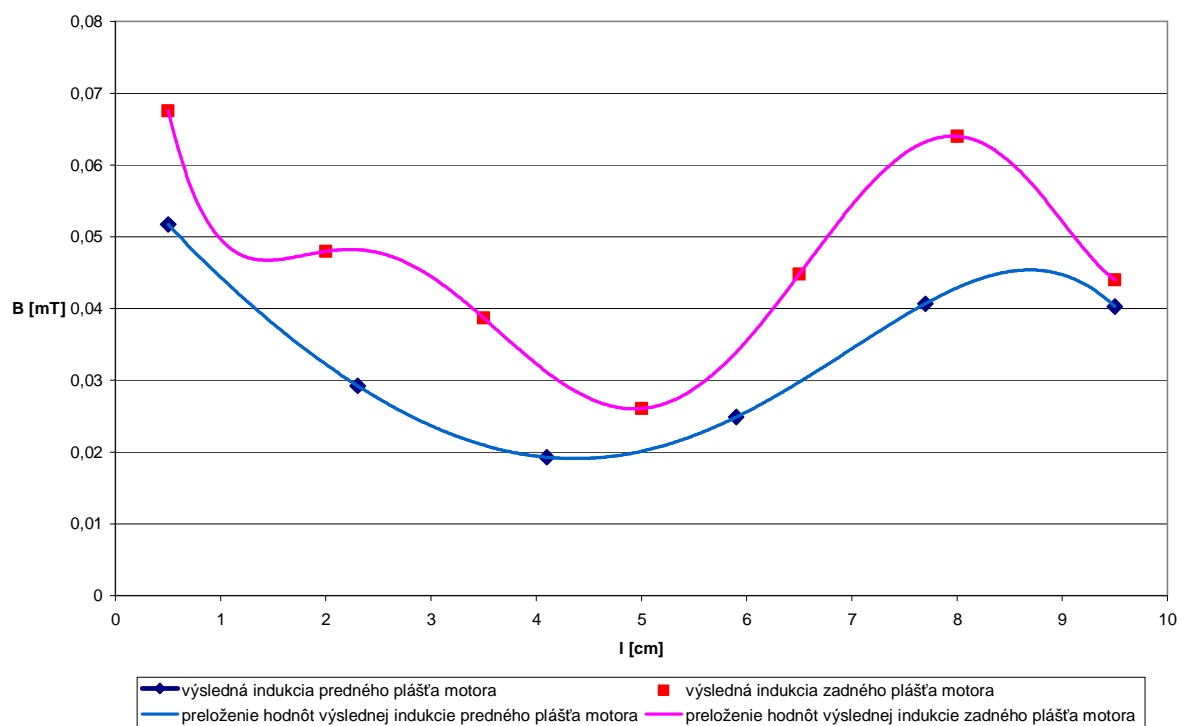
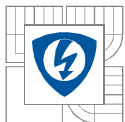
Grafické znázornenie zadného čela motora má zdeformovaný tvar, ktorý je spôsobený vynechaním dvoch bodov z navrhutej meranej siete bodov. Body boli vynechané z dôsledku prekážok v podobe hriadeľa a napájania motora. Jednotlivé menšie výstupky v grafe boli spôsobené meraním v blízkosti dier v plášti motora. Magnetické pole, rovnako ako v predošlom prípade (predné čelo motora), nadobudlo najväčších hodnôt indukcie v krajných rohoch. Najväčší vplyv na magnetické pole zadného čela motora mal opäť rozptylový tok čela vinutia (v tomto prípade zadného). Hodnoty nameranej indukcie v strednej časti zadného čela motora boli vyšších hodnôt v porovnaní s hodnotami predného čela. Bolo to spôsobené menšou hrúbkou steny (viď obrázok 20). V krajných rohoch však došlo ku zmene, pretože hrúbka stien sa zmenšila.



Graf 7. Grafické znázornenie výslednej indukcie a jej zložiek (x, y, z) v horizontálnej ose vzdialenej 15 mm od strednej osi zadného plášťa motora v závislosti na vzdialenosti

Pre znázornenie výslednej indukcie a jej zložiek (x, y, z) bola vybraná horizontálna os zadného čela vzdialená 15 mm od stredovej osi plášťa z dôsledku výskytu hluchého bodu v stredovej osi. Hluchý bod sa spôsobil vplyvom prekážajúceho hriadeľa v mieste merania. Z priebehov dosahuje najväčších hodnôt opäť z-ová zložka. Príčina nesúmernosti výslednej a z-ovej zložky indukcie je spôsobená ako v predchádzajúcom prípade, pri prednej ploche plášťa motora, odlišnou polohou odpovedajúcich si fázy voči sebe.

Porovnanie priebehov indukcií na prednom a zadnom plášti motora je uvedené v grafe 8. Priebeh výslednej indukcie na zadnom plášti je zdeformovanejší oproti priebehu predného plášťa, čo môže byť zapríčinené polohou osi nachádzajúcou sa v blízkosti diery v plášti. Veľkosti hodnôt vo vzájomnom porovnaní sú nepresné, vzhľadom k tomu, že osi v ktorých bolo prevádzané meranie boli od seba posunuté o 6 mm.



Graf 8. Porovnanie priebehov výslednej indukcie prednej a zadnej plochy plášťa motora

7 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POĽA ASYNCHRÓNNEHO MOTORA POMOCOU PROGRAMU FEMM

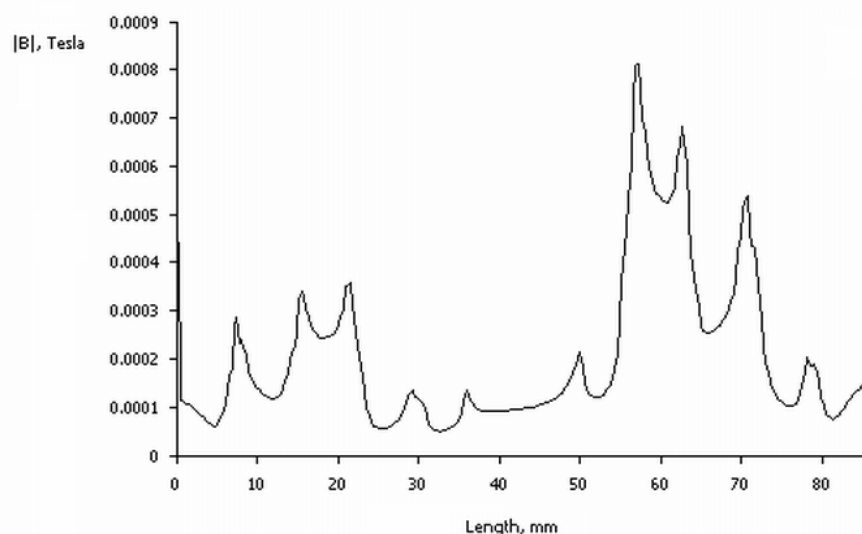
Pre výpočet magnetického poľa na povrchu motora metódou konečných prvkov v programe FEMM bol potrebný namodelovaný model daného asynchrónneho motora. K dispozícii k tomuto účelu bol zjednodušený model vytvorený v programe *Inventor*. V *Inventore* bol vytvorený prierez motora a uložený s príponou .dxf, pretože importovanie súborov je vo FEMMe umožnené iba s touto príponou. Pred výpočtom sa nadefinovala nulová podmienka, nadefinovali sa jednotlivým častiam rezu materiály a veľkosti prúdov do drážok pre jednotlivé fázy. Hodnoty prúdov sa určili na základe zmeranej hodnoty prúdu pri meraní, počtu závitov jednej cievky ($n = 68$ závitov), fázových posunov jednotlivých fázy a orientácia podľa začiatkov a koncov vinutí. Vytvorila sa dostatočne hustá sieť bodov v ktorých sa previedol výpočet.

Analýza výsledkov sa uskutočnila v jednej rovine na povrchu vrchného plášťa motora. Rovina bola totožná s priečnou osou povrchu plášťa motora zmeranou pomocou Hallovej sondy (viď obrázok 21). Na základe zhodnosti sa umožnilo porovnať vypočítané hodnoty s nameranými.

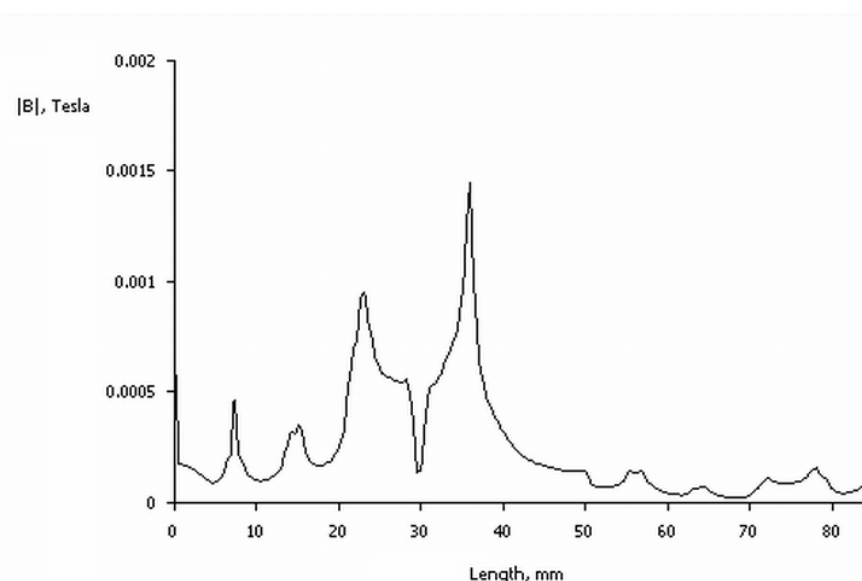


Obrázok 21. Naznačená zmeraná os vrchného plášťa asynchrónneho motora, porovnávaná s vypočítanými hodnotami vo FEMM.

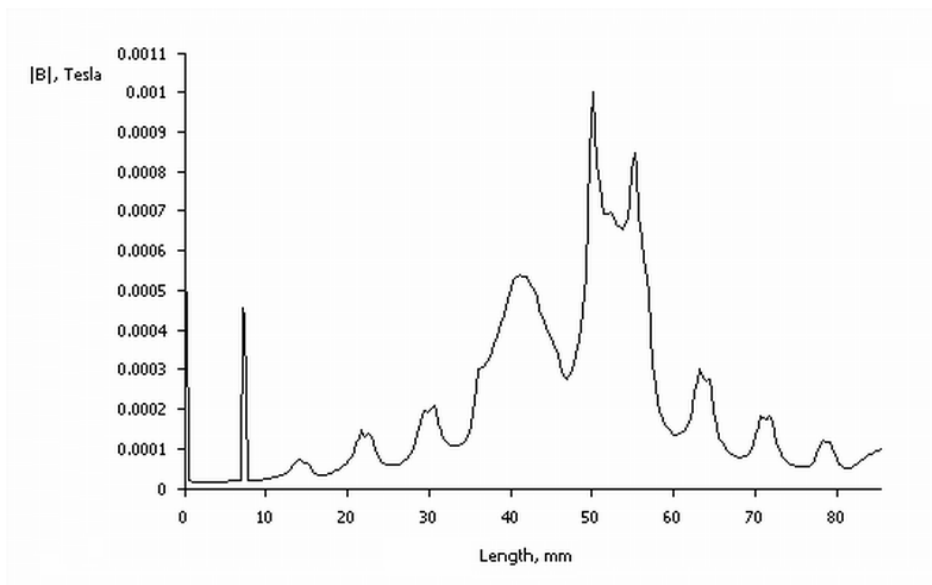
Vzhľadom k tomu, že magnetické pole v okolí motora je dynamické a výpočet vo FEMMe má statický charakter, bolo nutné vytvoriť dynamické pole pootáčaním vinutí v drážkach statora. Každá fáza sa pootáčala po 20° až na celkové pootočenie 120° . Pri každom pootočení sa previedol výpočet, čím sa dosiahlo šiestich analýz. Pri zhodných polohách pootáčaných statorových vinutí s prúdmi opačného charakteru, boli analýzy totožné. Tým sa konečný výpočet dynamického poľa obmedzil na tri priebehy vypočítanej indukcie (grafy 9,10,11). Strednou hodnotou z nich potom vznikol priebeh odpovedajúci dynamickému magnetickému pólu v priečnom reze povrchu plášťa motora. Vypočítané hodnoty sa následne porovnali s nameranými (viď graf 12).



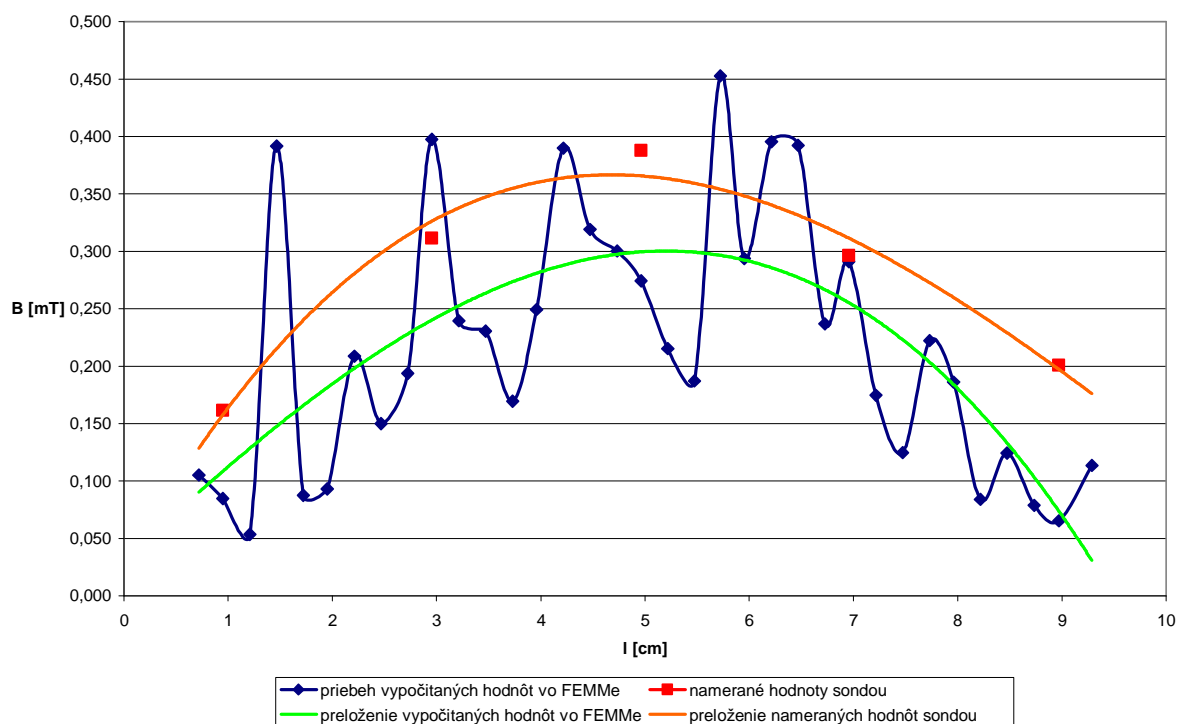
Graf 9. Statický priebeh magnetickej indukcie pre okamih pootočenia fázy o uhol $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 60^\circ$



Graf 10. Statický priebeh magnetickej indukcie pre okamih pootočenia fázy o uhol $\alpha = 20^\circ$, $\alpha = 80^\circ$

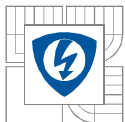


Graf 11. Statický priebeh magnetickej indukcie pre okamih pootočenia fázy o uhol $\alpha = 40^\circ$, $\alpha = 100^\circ$



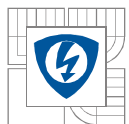
Graf 12. Grafické porovnanie vypočítaných hodnôt metódou konečných prvkov s nameranými hodnotami pomocou Hallovej sondy v strednej priecnej ose vrchného povrchu plášťa

V grafickom znázornení indukcií predstavuje modrý priebeh výsledný tvar magnetického poľa získaný za pomoci vypočítaných hodnôt v programe FEMM. Zubkovitý tvar priebehu je spôsobený členitosťou plášťa motora, pričom spodné hodnoty v zubkovitom priebehu presne odpovedajú výrezom v plášti motora. V programe FEMM sa vypočítali hodnoty indukcie na celej dĺžke osi, na rozdiel od získaných hodnôt meraním. Oproti nameranému priebehu je preto jeho



znázornenie tvaru magnetického poľa na plášti výpovednejšie. Je to dané tým, že pri meraní magnetickej indukcie Hallovou sondou na povrchu motora, bolo meranie obmedzené len na miesta s rovnakou výškovou úrovňou.

Pre názorné grafické porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt magnetickej indukcie sa hodnoty preložili. Preloženie nameraných hodnôt predstavuje oranžová krivka a vypočítané krivka zelená. Pri preložení však došlo k určitej deformácii. Vypočítané hodnoty vyšli menšie, čo môže byť spôsobené nesprávnym priradením materiálov modelu. Došlo k tomu z dôvodu, že k motoru, vyrobenému ako pokusná vzorka, neboli k dispozícii potrebné vlastnosti použitých materiálov. Hodnoty sa od seba líšia zhruba o 23%.



8 ZÁVER

Práca obsahuje základný teoretický súhrn magnetického poľa a uvádza aj rozdelenie magnetických senzorov využívaných pri meraní magnetického poľa vo vzduchu. Ďalej sú v práci popísané základné princípy funkcie najpoužívanejších senzorov v súčasnej dobe. V praxi sa najčastejšie uplatňujú Hallove, fluxgate a magnetorezistívne feromagnetické AMR senzory. Hlavnou výhodou všetkých týchto senzorov je možnosť integrácie do čipov malých rozmerov a ich veľká citlivosť.

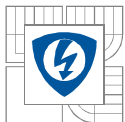
Cieľom práce bolo zmerať magnetické pole v okolí elektrického stroja. Ďalšou úlohou bolo znázorniť rozloženie magnetického poľa na základe 3D grafického spracovania nameraných hodnôt. K tomuto účelu bolo zvolené meranie magnetického poľa pomocou trojsovej Hallovej sondy. Konkrétne sa jednalo o prístroj od firmy F.W. Bell, model 7030 Gauss/Teslameter. Meranie prebiehalo na asynchrónnom motore vyrobenom ako pokusný model spoločnosťou EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Keďže motor nebol vybavený žiadnym chladiacim zariadením, bolo meranie prevedené v stave naprázdno, aby nedošlo k teplotnému poškodeniu motora. Rozloženie magnetického poľa v okolí motora bolo prevedené na troch plochách plášťa motora – vrchnej ploche a prednom a zadnom čele. Namerané hodnoty boli následne znázornené v 3D grafoch pomocou programu Matlab a taktiež v 2D grafoch s použitím programu Excel.

V súčasnosti sa často pre teoretické zistenie veľkostí a rozloženia magnetických polí v okolí strojov využívajú programy pracujúce s metódou konečných prvkov. Pre porovnanie nameraných hodnôt boli dopočítané hodnoty magnetického poľa v programe FEMM.

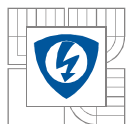
Priebeh magnetického poľa na vrchnej ploche motora bol zobrazený do 3D grafu. Z neho potom vyplýva, že magnetické pole dosahuje najväčších hodnôt v strednej pozdĺžnej osi vrchnej plochy plášťa. Najväčšie hodnoty sú nad čelami vinutí statora. Dochádza k tomu z toho dôvodu, že čelá vinutí statora nie sú uložené v drážkach motora, ale vo vzduchu. V okolí týchto miest sú potom namerané hodnoty indukcií väčšie. V 2D grafickom porovnaní jednotlivých zložiek indukcií (x , y , z) je zrejmé, že v strednej pozdĺžnej osi vrchného povrchu plášťa motora dosahuje z -ová zložka najväčšie hodnoty. Je to tým, že jej smer bol kolmý k orientácii Hallovej sondy u meracieho prístroja. To má za následok, že výsledná suma indukcií približne kopíruje z -ovú zložku indukcie.

Porovnaním predného a zadného čela plášťa motora je vidieť, že hodnoty indukcií v strednej oblasti zadného čela sú väčšie oproti hodnotám strednej oblasti predného čela. Tento jav je daný konštrukčným vyhotovením, t.j. menšou hrúbkou steny na zadnom čele. Avšak v krajných rohoch plášťa dosahujú indukcie na prednom čele väčších hodnôt, vzhľadom k tomu, že hrúbky stien v rohoch sú menšie. V stredných oblastiach predného a zadného čela sú menšie hodnoty indukcií oproti krajným hodnotám, čo je spôsobené opäť ich konštrukčným vyhotovením. V 2D grafickom porovnaní zložiek indukcií v horizontálnych osiach obidvoch plôch plášťa vychádzajú z -ové zložky indukcie opäť najväčšie zo spomínaných príčin. Im zodpovedajúce výsledné sumy majú približne rovnaký priebeh. Nesymetrickosť výsledných indukcií v krajných miestach v navzájom rozdielnych horizontálnych osiach pre predné a zadné čelo je spôsobená odlišnou polohou zodpovedajúcich si vinutí jednej fázy voči sebe.

Grafický priebeh vypočítaných hodnôt metódou konečných prvkov má v porovnaní s nameranými hodnotami zúbkovitý priebeh. To je spôsobené tým, že hodnoty boli vypočítané po celej priečnej osi vrchného povrchu plášťa motora. Pri meraní magnetického poľa Hallovou sondou bolo meranie prevádzané iba v miestach s rovnakou úrovňovou výškou na povrchu plášťa motora. Z toho dôvodu je tvar vypočítaného priebehu výpovednejší. Vypočítané menšie hodnoty

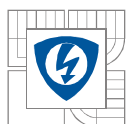


mohli byt' spôsobené nesprávnym priradením materiálov modelu motora. Neboli k dispozícii potrebné vlastnosti použitých materiálov. Hodnoty vyšli rozdielne zhruba o 23%.



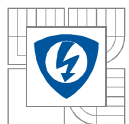
ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] Therapy Systems spol. s r.o.: Magnetické pole,
<http://www.therapy.cz/magneticke-pole.php>
- [2] Vidlička, M.: Magnetické pole,
<http://www.supermagnety.cz/cz/64/teoreticky-uvod/magneticke-pole/>
- [3] Sinomag s.r.o.: Permanentní magnety, Co je třeba vědět o magnetech,
http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf
- [4] Stacionární magnetické pole,
<http://www.vysokeskoly.cz/maturitniotazky/otazky/fyzika/MagnetickePole.htm>
- [5] Magnetické pole,
<http://www.google.com/search?hl=sk&q=Kolem+trval%C3%A9ho+magnetu+existuje+magnetick%C3%A9+&btnG=H%C4%BEada%C5%A5+v+Google&lr=&aq=f&oq=>
- [6] Jandora, R.: Stacionární magnetické pole,
<http://www.sweb.cz/radek.jandora/f15.htm>
- [7] Daxler K., Kašpar P., Ripka P.: Magnetické prvky a měření, ČVUT. Praha 1999
- [8] Vojáček, A.: Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. princip, 2007,
<http://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip>
- [9] Elektrotechnická měření,
Technická literatura. Praha 2002
- [10] Vojáček, A.: FLUXGATE SENZORY pro měření mag. polí 1,2., 2006,
<http://automatizace.hw.cz/search/node/fluxgate+senzory>
- [11] Vopálenský, M. – Ripka, P.: Magnetorezistivní senzory, Katedra meraní, FEL ČVUT, Praha, 2002
http://www.volny.cz/vopalem/Publications/SlabObzory/Magnetorezistivni_senzory.pdf
- [12] Hruška, K.: Svobodný software ve vědě, 2008
<http://www.abclinuxu.cz/clanky/recenze/svobodny-software-ve-vede>
- [13] Hála, A.: *VÝUKA ELEKTROMAGNETISMU S PODPOROU PROGRAMŮ MEP, MMAP A FEMM*
http://www.vabo.cz/stranky/STO9/sbornik/clanky/Ales_Hala3.pdf

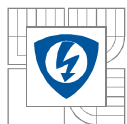


ZOZNAM OBRÁZKOV, GRAFOV

Obrázok 1. Znázornenie spinovej rotácie a obiehania okolo jadra atómu [1].....	9
Obrázok 2. Indukčné čiary zobrazujúce magnetické pole tyčového magnetu [5].....	11
Obrázok 3. Indukčné čiary zobrazujúce magnetické pole vodiča s prúdom	12
Obrázok 4. Magnetická sila F_m pôsobiaca na vodič v homogénnom magnetickom poli [6]	12
Obrázok 5. Indukčné čiary zobrazujúce magnetické pole v okolí dvoch rovnobežných vodičov, ktorými preteká prúd: a) súbežné vodiče, b) protibežné vodiče	13
Obrázok 6. Magnetická sila F_m dvoch rovnobežných vodičov s prúdom: a) vzájomne orientovaných, b) opačne orientovaných [6].....	13
Obrázok 7. Znázornenie pôsobenia magnetickej indukcie vzniknutého indukovaného prúdu proti indukcii zdroja jeho vzniku (Lenzov zákon) [5]	15
Obrázok 8. Smer prúdu Hallovým elementom: a) bez pôsobenia magnetického poľa na element, b) pri pôsobení magnetického poľa na element [8].....	17
Obrázok 9. Integrované jednočipové senzory založené na Hallovom jave [8]	18
Obrázok 10. Skica základného usporiadania najjednoduchšieho fluxgate senzora [10].....	19
Obrázok 11. Príklad prevedenia niektorých komerčných fluxgate senzorov a snímačov [10].....	20
Obrázok 12. Anizotropný magnetorezistívny jav vo feromagnetickom prúžku [11].....	20
Obrázok 13. Závislosť rezistivity anizotropného magnetorezistoru na veľkosti pôsobiaceho poľa v kolmom smere podľa (vzťahu 2.4) [11]	21
Obrázok 14. Princíp činnosti feromagnetického magnetorezistívneho senzoru [9].....	21
Obrázok 15. Momentová charakteristika asynchrónneho stroja	23
Obrázok 16. Náhradná schéma asynchrónneho motora: a) úplná, b) neúplná	25
Obrázok 17. Ukážka prostredia programu FEMM.....	27
Obrázok 18. Zobrazenie asynchrónneho motora a prístrojov na pracovisku	29
Obrázok 19. Konštrukčné vyhotovenie statora daného asynchrónneho motora	31
Obrázok 20. Konštrukčné prevedenie zadného a predného čela daného asynchrónneho motora..	31
Obrázok 21. Naznačená zmeraná os vrchného plášťa asynchrónneho motora, porovnávaná s vypočítanými hodnotami vo FEMM.	37
Graf 1. Grafické 3D spracovanie výsledných indukcií prístroja nameraných na vrchnej ploche plášťa asynchrónneho motora	30
Graf 2. Grafické spracovanie zložiek výslednej indukcie (x, y, z) v pozdĺžnej strednej osi.....	32
Graf 3. Priebeh výslednej indukcie prístroja a dopočítanej indukcie z jednotlivých zložiek (x, y, z) v priečnej ose vrchnej plochy plášťa motora	32



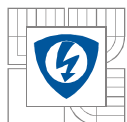
Graf 4. Grafické 3D spracovanie výsledných indukcií prístroja nameraných na prednej ploche plášťa asynchrónneho motora	33
Graf 5. Grafické znázornenie výslednej indukcie a jej zložiek (x, y, z) v horizontálnej ose vzdialenej 9 mm od strednej osi predného plášťa motora v závislosti na vzdialenosti. ..	34
Graf 6. Grafické 3D spracovanie výsledných indukcií prístroja nameraných na zadnej ploche plášťa asynchrónneho motora	34
Graf 7. Grafické znázornenie výslednej indukcie a jej zložiek (x, y, z) v horizontálnej ose vzdialenej 15 mm od strednej osi predného plášťa motora v závislosti na vzdialenosti .	35
Graf 8. Porovnanie priebehov výslednej indukcie prednej a zadnej plochy plášťa motora	36
Graf 9. Statický priebeh magnetickej indukcie pre okamih pootočenia fázy o uhol $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 60^\circ$	38
Graf 10. Statický priebeh magnetickej indukcie pre okamih pootočenia fázy o uhol $\alpha = 20^\circ$, $\alpha = 80^\circ$	38
Graf 11. Statický priebeh magnetickej indukcie pre okamih pootočenia fázy o uhol $\alpha = 40^\circ$, $\alpha = 100^\circ$	39
Graf 12. Grafické porovnanie vypočítaných hodnôt metódou konečných prvkov s nameranými hodnotami pomocou Hallovej sondy v strednej pričnej ose vrchného povrchu plášťa..	39



PRÍLOHA A – TABUĽKY NAMERANÝCH A VYPOČÍTANÝCH HODNÔT

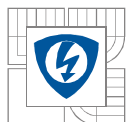
Tabuľka 1. Pre FEMM

Snímaná vzdialenosť šírky motora zodpovedajúca posunu fázy o uhol α ; [cm]			Hodnota indukcie pri posune fázy o uhol α ; [mT]			Priemerná vzdialenosť šírky motora [cm]	Priemerná hodnota indukcie [mT]
$\alpha=0^\circ$, $\alpha=60^\circ$	$\alpha=20^\circ$, $\alpha=80^\circ$	$\alpha=40^\circ$, $\alpha=100^\circ$	$\alpha=0^\circ$, $\alpha=60^\circ$	$\alpha=20^\circ$, $\alpha=80^\circ$	$\alpha=40^\circ$, $\alpha=100^\circ$		
0	0	0	1,167E-01	1,808E-01	1,826E-02	0	0,105
0,229	0,230	0,229	9,421E-02	1,441E-01	1,585E-02	0,229	0,085
0,486	0,489	0,486	5,979E-02	8,372E-02	1,645E-02	0,487	0,053
0,743	0,748	0,743	2,817E-01	4,574E-01	4,362E-01	0,745	0,392
1,001	1,007	1,001	1,407E-01	9,859E-02	2,364E-02	1,003	0,088
1,230	1,237	1,230	1,193E-01	1,230E-01	3,719E-02	1,232	0,093
1,487	1,496	1,487	2,480E-01	3,157E-01	6,228E-02	1,490	0,209
1,744	1,755	1,744	2,510E-01	1,641E-01	3,482E-02	1,748	0,150
2,002	2,013	2,002	2,681E-01	2,485E-01	6,504E-02	2,006	0,194
2,230	2,243	2,230	2,402E-01	8,193E-01	1,329E-01	2,235	0,397
2,488	2,502	2,488	5,704E-02	6,024E-01	5,888E-02	2,493	0,239
2,745	2,761	2,745	7,265E-02	5,409E-01	7,800E-02	2,751	0,231
3,003	3,020	3,003	1,148E-01	1,971E-01	1,967E-01	3,008	0,170
3,231	3,250	3,231	5,073E-02	5,831E-01	1,142E-01	3,238	0,249
3,489	3,509	3,489	7,092E-02	9,623E-01	1,370E-01	3,495	0,390
3,746	3,768	3,746	9,581E-02	5,297E-01	3,319E-01	3,753	0,319
4,003	4,027	4,003	9,147E-02	3,073E-01	5,022E-01	4,011	0,300
4,232	4,257	4,232	9,574E-02	2,040E-01	5,228E-01	4,240	0,274
4,489	4,516	4,489	1,029E-01	1,626E-01	3,799E-01	4,498	0,215
4,747	4,775	4,747	1,237E-01	1,405E-01	2,977E-01	4,756	0,187
5,004	5,005	5,004	2,140E-01	1,427E-01	1,001E+00	5,004	0,453
5,233	5,235	5,233	1,198E-01	6,518E-02	6,966E-01	5,234	0,294
5,490	5,494	5,490	2,704E-01	1,119E-01	8,045E-01	5,491	0,396
5,748	5,753	5,748	7,688E-01	9,862E-02	3,095E-01	5,749	0,392
6,005	6,011	6,005	5,345E-01	3,978E-02	1,362E-01	6,007	0,237
6,234	6,241	6,234	6,346E-01	3,661E-02	2,013E-01	6,236	0,291
6,491	6,500	6,491	2,814E-01	4,897E-02	1,936E-01	6,494	0,175
6,748	6,759	6,748	2,730E-01	1,936E-02	8,139E-02	6,752	0,125
7,006	7,018	7,006	4,946E-01	3,691E-02	1,350E-01	7,010	0,222
7,235	7,248	7,235	3,137E-01	1,011E-01	1,434E-01	7,239	0,186
7,492	7,507	7,492	1,115E-01	8,477E-02	5,598E-02	7,497	0,084
7,749	7,766	7,749	1,419E-01	1,472E-01	8,388E-02	7,755	0,124
8,007	8,025	8,007	1,132E-01	5,248E-02	7,087E-02	8,013	0,079
8,235	8,284	8,235	8,678E-02	5,129E-02	5,775E-02	8,252	0,065
8,550	8,600	8,550	1,505E-01	9,242E-02	9,806E-02	8,567	0,114



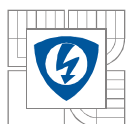
Tabuľka 2. Pre meranie na vrchnom povrchu plášťa motora

Poloha snímania indukcie na ploche [cm]		Indukcia nameraná na vrchnej ploche motora B [mT]					Chyba metódy [%]
x-ová súradnica	y-ová súradnica	x-ová zložka	y-ová zložka	z-ová zložka	Prístroja	Dopočítaná	
0,5	1	0,07914	0,08948	0,09013	0,14813	0,14964	1,0219
	3	0,19175	0,14247	0,06934	0,25293	0,24874	1,6548
	5	0,22195	0,14756	0,08927	0,27896	0,28108	0,7593
	7	0,1133	0,11551	0,06947	0,17447	0,17608	0,9250
	9	0,04971	0,04825	0,07351	0,10071	0,10101	0,2971
2,5	1	0,09682	0,15857	0,10939	0,21353	0,21560	0,9709
	3	0,19315	0,40597	0,65312	0,79495	0,79290	0,2584
	5	0,49827	0,44818	1,00771	1,20494	1,21021	0,4377
	7	0,22737	0,33752	0,53952	0,68344	0,67579	1,1186
	9	0,08214	0,11618	0,20645	0,25021	0,25073	0,2085
4,5	1	0,10742	0,11790	0,14015	0,20954	0,21232	1,3286
	3	0,28573	0,16161	0,36372	0,48471	0,48995	1,0812
	5	0,34503	0,34772	0,47264	0,69380	0,68069	1,8891
	7	0,18852	0,30721	0,26757	0,44762	0,44890	0,2860
	9	0,03397	0,08482	0,22291	0,24021	0,24091	0,2911
6,5	1	0,07644	0,08939	0,12336	0,17038	0,17044	0,0379
	3	0,12171	0,14831	0,28297	0,34195	0,34188	0,0208
	5	0,12612	0,26376	0,30815	0,43145	0,42477	1,5476
	7	0,09035	0,23855	0,2077	0,32253	0,32895	1,9907
	9	0,02193	0,06008	0,2108	0,21963	0,22029	0,3000
8,5	1	0,07132	0,07948	0,12213	0,16134	0,16223	0,5531
	3	0,11892	0,11376	0,26137	0,31152	0,30886	0,8523
	5	0,20200	0,17223	0,28673	0,38792	0,39074	0,7281
	7	0,15257	0,17755	0,19245	0,29667	0,30305	2,1502
	9	0,02309	0,04363	0,19502	0,20082	0,20117	0,1745
10,5	1	0,08136	0,06893	0,1183	0,15713	0,15927	1,3594
	3	0,11915	0,10943	0,25742	0,30576	0,30403	0,5645
	5	0,18243	0,16838	0,26602	0,35715	0,36387	1,8807
	7	0,14717	0,15898	0,16892	0,27763	0,27471	1,0504
	9	0,02925	0,03139	0,18463	0,18834	0,18955	0,6424
12,5	1	0,08418	0,08388	0,12969	0,17553	0,17590	0,2121
	3	0,08163	0,18483	0,28176	0,34470	0,34672	0,5858
	5	0,15056	0,22994	0,25994	0,38126	0,37830	0,7768
	7	0,15443	0,19617	0,15217	0,28945	0,29238	1,0128
	9	0,02964	0,04710	0,18565	0,19241	0,19381	0,7283
14,5	1	0,09427	0,11521	0,12547	0,19442	0,19469	0,1372
	3	0,13259	0,29821	0,49432	0,58702	0,59234	0,9055
	5	0,27243	0,39412	0,78292	0,90736	0,91788	1,1599
	7	0,20120	0,29953	0,33137	0,48299	0,48990	1,4315
	9	0,04927	0,08003	0,17863	0,20237	0,20184	0,2599
17	1	0,08448	0,03247	0,10387	0,13725	0,13777	0,3777
	3	0,15207	0,10543	0,01843	0,18625	0,18596	0,1567
	5	0,19432	0,11565	0,10521	0,24413	0,24941	2,1619
	7	0,07021	0,14598	0,04421	0,17055	0,16791	1,5473
	9	0,0569	0,04713	0,08618	0,11347	0,11352	0,0404



Tabuľka 3. Pre meranie na prednom povrchu plášťa motora

Poloha snímania indukcie na ploche [cm]		Indukcia nameraná na prednom čele motora B [mT]					Chyba metódy [%]
x-ová súradnica	y-ová súradnica	x-ová zložka	y-ová zložka	z-ová zložka	Prístroja	Dopočítaná	
0,5	0,5	0,10188	0,10346	0,08570	0,16790	0,16861	0,4205
	2,3	0,07123	0,07863	0,09027	0,13672	0,13930	1,8886
	4,1	0,02371	0,03146	0,03334	0,05261	0,05161	1,9034
	5,9	0,02094	0,02675	0,03492	0,04840	0,04872	0,6572
	7,7	0,01372	0,04407	0,02730	0,05370	0,05363	0,1388
	9,5	0,06724	0,01820	0,09066	0,11446	0,11433	0,1123
2,3	0,5	0,06382	0,01559	0,13114	0,14523	0,14668	0,9954
	2,3	0,03065	0,03640	0,01593	0,04981	0,05018	0,7451
	4,1	0,01945	0,01658	0,02672	0,03691	0,03698	0,1763
	5,9	0,01227	0,01187	0,01080	0,02005	0,02020	0,7543
	7,7	0,01051	0,01971	0,01891	0,02990	0,02927	2,1185
	9,5	0,03326	0,02137	0,01524	0,04245	0,04237	0,1900
4,1	0,5	0,01910	0,00758	0,04956	0,05172	0,05365	3,7341
	2,3	0,00683	0,01400	0,02554	0,02925	0,02992	2,2754
	4,1	0,01153	0,01325	0,00762	0,01927	0,01915	0,6437
	5,9	0,01323	0,02055	0,00486	0,02487	0,02492	0,1969
	7,7	0,01344	0,00640	0,03767	0,04069	0,04051	0,4488
	9,5	0,02319	0,01956	0,02531	0,04026	0,03951	1,8652
5,9	0,5	0,03425	0,01441	0,01554	0,03958	0,04028	1,7599
	2,3	0,02317	0,00728	0,02628	0,03528	0,03578	1,4282
	4,1	0,01755	0,01040	0,02024	0,02839	0,02874	1,2226
	5,9	0,00856	0,01080	0,00442	0,01419	0,01447	1,9900
	7,7	0,01937	0,01293	0,01778	0,02907	0,02930	0,7924
	9,5	0,01419	0,01358	0,04539	0,04950	0,04946	0,0863
7,7	0,5	0,06468	0,06858	0,08790	0,12675	0,12889	1,6899
	2,3	0,04067	0,01285	0,04312	0,06005	0,06065	1,0003
	4,1	0,02017	0,00748	0,00960	0,02320	0,02356	1,5394
	5,9	0,00933	0,01116	0,01240	0,01914	0,01911	0,1345
	7,7	0,02795	0,02140	0,01035	0,03608	0,03669	1,6956
	9,5	0,09018	0,09373	0,10426	0,16932	0,16670	1,5491



Tabuľka 4. Pre meranie na zadnom povrchu plášťa motora

Poloha snímania indukcie na ploche [cm]		Indukcia nameraná na zadnom čele motora B [mT]					Chyba metódy [%]
x-ová súradnica	y-ová súradnica	x-ová zložka	y-ová zložka	z-ová zložka	Prístroja	Dopočítaná	
0,5	0,5	0,01680	0,02041	0,12019	0,12325	0,12306	0,1519
	2,0	0,02457	0,05457	0,08961	0,10788	0,10776	0,1142
	3,5	0,02165	0,03088	0,04097	0,05612	0,05569	0,7748
	5,0	0,01942	0,02113	0,05274	0,06001	0,06004	0,0544
	6,5	0,02013	0,03392	0,03458	0,05242	0,05246	0,0674
	8,0	0,03303	0,06383	0,06792	0,09892	0,09889	0,0347
	9,5	0,03864	0,03269	0,10994	0,12083	0,12103	0,1663
2	0,5	0,04812	0,03164	0,04954	0,07538	0,07597	0,7774
	2,0	0,02476	0,02278	0,03266	0,04678	0,04689	0,2349
	3,5	0,02272	0,02715	0,01998	0,04054	0,04065	0,2743
	5,0	0,02517	0,01133	0,01424	0,03120	0,03106	0,4512
	6,5	0,01822	0,01479	0,03843	0,04516	0,04503	0,2909
	8,0	0,02085	0,04443	0,02732	0,05629	0,05617	0,2122
	9,5	0,05991	0,01141	0,10615	0,12228	0,12242	0,1164
3,5	0,5	0,03002	0,02143	0,02481	0,04402	0,04445	0,9814
	2,0	0,01497	0,00773	0,06214	0,06401	0,06438	0,5835
	3,5	0,00773	0,03572	0,02576	0,04479	0,04471	0,1720
	5,0	0,02048	0,01064	0,01207	0,02607	0,02604	0,0972
	6,5	0,03097	0,01455	0,01807	0,03867	0,03870	0,0668
	8,0	0,02516	0,03967	0,01049	0,04797	0,04813	0,3396
	9,5	0,00879	0,01956	0,06404	0,06757	0,06754	0,0518
5	0,5	0,02278	0,00928	0,04669	0,05266	0,05277	0,2148
	2,0	0,02912	0,02874	0,03264	0,05243	0,05234	0,1743
	3,5	0,02192	0,02410	0,01052	0,03415	0,03423	0,2460
	5,0	0	0	0	0	0	0
	6,5	0,01184	0,03064	0,02274	0,04011	0,03995	0,3958
	8,0	0,01595	0,01705	0,06157	0,06621	0,06585	0,5466
	9,5	0,02696	0,02121	0,04148	0,05378	0,05383	0,0865
6,5	0,5	0,00763	0,01942	0,05635	0,06025	0,06009	0,2674
	2,0	0,01174	0,04208	0,03307	0,05474	0,05479	0,0953
	3,5	0,01449	0,00731	0,05583	0,05802	0,05814	0,2087
	5,0	0,00668	0,01757	0,02158	0,02872	0,02862	0,3531
	6,5	0,01971	0,02386	0,02432	0,03931	0,03936	0,1284
	8,0	0,02265	0,01034	0,04402	0,05079	0,05057	0,4259
	9,5	0,02920	0,01777	0,02144	0,04043	0,04035	0,1990
8	0,5	0,07617	0,02891	0,10916	0,13618	0,13621	0,0231
	2,0	0,03473	0,03932	0,00922	0,05330	0,05327	0,0642
	3,5	0,03314	0,00872	0,03649	0,04999	0,05006	0,1363
	5,0	0	0	0	0	0	0
	6,5	0,00646	0,00975	0,08497	0,08743	0,08577	1,8987
	8,0	0,01898	0,01975	0,02212	0,03502	0,03521	0,5366
	9,5	0,03944	0,01051	0,07638	0,08603	0,08660	0,6647